



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

Estudio del mecanizado de materiales compuestos

Autor: Laura Montero García

Tutor: Xavier Soldani

Leganés, Julio de 2010

RESUMEN

La idea de realizar el siguiente proyecto surge debido al gran desconocimiento que se tiene sobre el comportamiento de los materiales compuestos reforzados con fibras al ser mecanizados y al gran incremento que están teniendo hoy en día estos materiales en la industria.

Hasta ahora, se cuenta con una escasa bibliografía sobre su comportamiento al ser mecanizados y no pueden ser comparados con otros materiales como los metales. Por ello, en este trabajo se tienen como objetivos validar el modelo propuesto para materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio (GFRP) y analizar cómo se comportan los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono (CFRP). Por último, se hace una comparación del comportamiento de estos dos tipos de materiales, para sacar conclusiones del comportamiento de un material dúctil como el vidrio y otro frágil como el carbono.

Dichos estudios se llevan a cabo a través de simulaciones en ABAQUS, un programa de elementos finitos de donde se obtienen las fuerzas de corte, de avance y el daño de la matriz para ser analizadas más tarde.

De todo este proyecto, se obtienen conclusiones interesantes que ayudarán a simplificar y reducir el coste de futuros ensayos y experimentos. Además, se proponen posibles trabajos futuros que ayudarían a complementar este y trabajos anteriores, siguiendo con la investigación sobre este tema.

ÍNDICE

<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	1
<u>ÍNDICE DE TABLAS</u>	5
<u>INTRODUCCIÓN</u>	6
<u>MOTIVACIÓN</u>	6
<u>OBJETIVOS</u>	8
<u>FASES DEL DESARROLLO</u>	8
<u>MEDIOS EMPLEADOS</u>	9
<u>ESTRUCTURA DE LA MEMORIA</u>	9
<u>1.- ESTUDIO TEÓRICO</u>	11
<u>1.1.- MATERIALES COMPUESTOS</u>	11
<u>1.1.1.- ¿Qué es un material compuesto?</u>	11
<u>1.1.2.- Clasificación.</u>	14
<u>1.1.3.- Aplicaciones.</u>	18
<u>1.2.- MECANIZADO.</u>	24
<u>1.2.1.- Corte ortogonal</u>	30
<u>1.2.2.- Mecanizado de los materiales compuestos</u>	34
<u>1.3.- ELEMENTOS FINITOS</u>	37
<u>2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL</u>	41
<u>2.1.- CORTE ORTOGONAL EXPERIMENTAL DE LOS MATERIALES COMPUESTOS</u>	41
<u>2.2.- SIMULACIÓN DEL CORTE ORTOGONAL DE MATERIALES COMPUESTOS</u>	49
<u>3.- MODELO NUMÉRICO</u>	51
<u>4.- VALIDACIÓN Y RESULTADOS</u>	62
<u>4.1.- MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS DE VIDRIO (GFRP)</u>	66
<u>4.2.- MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO (CFRP)</u>	86
<u>4.3.- COMPARACIÓN DE LOS GFRP Y CFRP</u>	95
<u>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</u>	101
<u>CONCLUSIONES</u>	101
<u>TRABAJOS FUTUROS</u>	105
<u>PRESUPUESTO</u>	106
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	108

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Figura 1.-Aplicación de los materiales compuestos en los automóviles [1].</u>	6
<u>Figura 2.- Materiales compuestos utilizados en el Boeing 787 [2].</u>	7
<u>Figura 1.1.- Raqueta de tenis constituida por matriz polimérica [3].</u>	15
<u>Figura 1.2.- Regulador de potencia a distancia formado por una matriz metálica reforzada con aluminio [4].</u>	15
<u>Figura 1.3.- Freno de disco constituido por materiales compuestos cerámicos [5].</u>	16
<u>Figura 1.4.- Tipos de compuestos según el refuerzo. De izquierda a derecha: compuesto particulado, compuesto fibroso y compuesto laminado [6].</u>	17
<u>Figura 1.5.- Tipos de compuestos fibrosos [6].</u>	18
<u>Figura 1.6.- Ejemplos de algunas aplicaciones de los materiales compuestos en la industria [7].</u>	19
<u>Figura 1.7.- De izquierda a derecha: fibra de carbono, fibra de aramida y fibra de vidrio [9].</u>	20
<u>Figura 1.8.- Comportamiento de σ-ϵ de varios materiales reforzados con fibras [10].</u>	23
<u>Figura 1.9.- Corte ortogonal y oblicuo, con inclinación i [11].</u>	24
<u>Figura 1.10.- Discretización de una herramienta como la suma de filos de corte rectos.</u>	25
<u>Figura 1.11.- Complejidad geométrica del corte oblicuo. Derecha: descomposición de las fuerzas en un plano perpendicular al filo [11].</u>	26
<u>Figura 1.12.- Velocidad de corte en torneado y fresado [12].</u>	27
<u>Figura 1.13.- Proceso de arranque de viruta en el mecanizado [12].</u>	28
<u>Figura 1.14.- Diferentes tipos de viruta en el mecanizado [12].</u>	29
<u>Figura 1.15.- Esquema herramienta-pieza. Parámetros más importantes [12].</u>	30
<u>Figura 1.16.- Velocidades en el corte ortogonal [12].</u>	33
<u>Figura 1.17.- Fuerzas en el corte ortogonal [13].</u>	33
<u>Figura 1.18.- Análisis de las deformaciones de un rodete en operación, simulado a 900 rpm, mediante el método de elementos finitos [14].</u>	37
<u>Figura 1.19.- Esquema sistema a analizar por MEF: dominio, contorno, condiciones de contorno [15].</u>	38
<u>Figura 2.1.- Orientación de las fibras medidas en sentido horario desde el eje x de la fibra. a) Orientación positiva. b) Orientación negativa [18].</u>	43

<i>Figura 2.2.- Modelo de mecanizado con una sola fibra con distintas orientaciones.</i> ...	44
<i>Figura 2.3.- Efecto de la orientación de fibra en la fuerza de corte (izquierda) y en la fuerza de avance (derecha) con una profundidad de corte de 0.05 mm [20].</i>	44
<i>Figura 2.4.- Variación de la fuerza de corte y la fuerza de avance con la orientación de la fibra y el ángulo de desprendimiento de la herramienta [21].</i>	45
<i>Figura 2.5.- Fuerza de corte (izquierda) y fuerza de avance (derecha). Comparación de resultados experimentales con los modelos construidos con criterio de máxima tensión y de Tsai-Hill [25].</i>	46
<i>Figura 2.6.- Variación de las fuerzas de corte (izquierda) y avance (derecha) con la orientación de fibra para diferentes profundidades de corte y ángulo de desprendimiento de 10° [27].</i>	47
<i>Figura 2.7.- a) Variación del daño de la matriz con la orientación de fibra para diferentes profundidades de corte. b) Variación del daño de la matriz con el ángulo de desprendimiento para diferentes orientaciones [27].</i>	48
<i>Figura 3.1.- Modelo numérico [35].</i>	53
<i>Figura 3.2.- Tamaño de la malla.</i>	54
<i>Figura 3.3.- Gráfica σ-ϵ. Comportamiento teórico.</i>	56
<i>Figura 3.4.- Gráfica σ-ϵ. Comportamiento real.</i>	56
<i>Figura 3.5.- Principales tensiones y direcciones en el conjunto fibra-matriz [35].</i>	57
<i>Figura 3.6.- Gráfica σ-ϵ. Comportamiento de la fibra y la matriz.</i>	58
<i>Figura 3.7.- Comparación del daño de la matriz (izquierda) y el daño de la fibra (derecha).</i>	60
<i>Figura 4.1.- Fuerza de corte en función del tiempo de mecanizado para el caso de CFRP con energía no constante y orientación de fibra 0°.</i>	63
<i>Figura 4.2.- Fuerza de corte en función de la orientación de fibra para el caso de CFRP y energía no constante.</i>	64
<i>Figura 4.3.- Evolución del daño de la matriz a compresión para el caso de GFRP, con energía no constante, ángulo de desprendimiento 5° y orientación -15°.</i>	65
<i>Figura 4.4.- Fuerza de corte para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía constante. Comparación de resultados con bibliografía.</i>	66
<i>Figura 4.5.- Fuerza de avance para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía constante. Comparación de resultados con bibliografía.</i>	67
<i>Figura 4.6.- Daño de la matriz a compresión para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía constante.</i>	68

<i><u>Figura 4.7.-Daño de la matriz a tracción para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía constante.</u></i>	69
<i><u>Figura 4.8.- Fuerza de corte para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía no constante. Comparación de resultados con bibliografía y con fuerza de corte con energía constante.</u></i>	71
<i><u>Figura 4.9.- Fuerza de avance para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía no constante. Comparación de resultados con bibliografía y con fuerza de corte con energía constante.</u></i>	71
<i><u>Figura 4.10.-Daño de la matriz a compresión para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía no constante.</u></i>	72
<i><u>Figura 4.11.-Daño de la matriz a tracción para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía no constante.</u></i>	73
<i><u>Figura 4.12.- Fuerza de corte para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.</u></i>	74
<i><u>Figura 4.13.- Fuerza de avance para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.</u></i>	75
<i><u>Figura 4.14.-Daño de la matriz a compresión para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.</u></i>	76
<i><u>Figura 4.15.-Daño de la matriz a tracción para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.</u></i>	77
<i><u>Figura 4.16.- Fuerza de corte para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante. Comparación de resultados con fuerza de corte con energía constante.</u></i>	78
<i><u>Figura 4.17.- Fuerza de avance para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante. Comparación de resultados con fuerza de corte con energía constante.</u></i>	79
<i><u>Figura 4.18.-Daño de la matriz a compresión para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante.</u></i>	80
<i><u>Figura 4.19.-Daño de la matriz a tracción para el vidrio con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante.</u></i>	81
<i><u>Figura 4.20.- Efecto del ángulo de desprendimiento sobre la fuerza de corte para el caso de GFRP con energía constante.</u></i>	82
<i><u>Figura 4.21.- Efecto del ángulo de desprendimiento sobre la fuerza de avance para el caso de GFRP con energía constante.</u></i>	83

<i><u>Figura 4.22.- Efecto del ángulo de desprendimiento sobre la fuerza de corte para el caso de GFRP con energía no constante.</u></i>	84
<i><u>Figura 4.23.- Efecto del ángulo de desprendimiento sobre la fuerza de avance para el caso de GFRP con energía no constante.</u></i>	85
<i><u>Figura 4.24.- Fuerza de corte para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.</u></i>	86
<i><u>Figura 4.25.- Fuerza de avance para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.</u></i>	87
<i><u>Figura 4.26.-Daño de la matriz a compresión para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.</u></i>	88
<i><u>Figura 4.27.-Daño de la matriz a tracción para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.</u></i>	89
<i><u>Figura 4.28.- Fuerza de corte para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante. Comparación con la fuerza de corte para energía constante.</u></i>	90
<i><u>Figura 4.29.- Fuerza de avance para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante. Comparación con la fuerza de corte para energía constante.</u></i>	91
<i><u>Figura 4.30.-Daño de la matriz a compresión para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante.</u></i>	92
<i><u>Figura 4.31.-Daño de la matriz a tracción para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante.</u></i>	93
<i><u>Figura 4.32.- Comparación del daño de la matriz a compresión (izquierda) y tracción (derecha) para orientación de fibra 90° y energía constante (arriba) y no constante (abajo).</u></i>	94
<i><u>Figura 4.33.- Comparación de las fuerzas de corte para el caso de GFRP y CFRP, ambos para energía constante.</u></i>	96
<i><u>Figura 4.34.- Comparación de las fuerzas de avance para el caso de GFRP y CFRP, ambos para energía constante.</u></i>	97
<i><u>Figura 4.35.- Comparación de las fuerzas de corte para el caso de GFRP y CFRP, ambos para energía no constante.</u></i>	98
<i><u>Figura 4.36.- Comparación de las fuerzas de avance para el caso de GFRP y CFRP, ambos para energía no constante.</u></i>	99

ÍNDICE DE TABLAS

<i><u>Tabla 1.1.- Distintas aplicaciones de los materiales compuestos en la industria.</u></i>	18
<i><u>Tabla 1.2.- Comparación de las propiedades de las matrices poliéster y epoxi [8].</u></i>	20
<i><u>Tabla 1.3.- Comparación de las propiedades de algunos tipos de fibras [8].</u></i>	21
<i><u>Tabla 1.4.- Propiedades de algunas fibras de refuerzo de matrices plásticas [8].</u></i>	22
<i><u>Tabla 3.1.- Propiedades mecánicas de los materiales compuestos.</u></i>	52
<i><u>Tabla 3.2.- Propiedades mecánicas de la herramienta.</u></i>	52

INTRODUCCIÓN

Se realiza una introducción en la que se explican los motivos que han llevado a realizar este proyecto, los objetivos que se pretenden conseguir al realizarlo, las fases que se han llevado a cabo, los medios empleados y la estructura de la memoria.

MOTIVACIÓN

En los últimos años se ha incrementado el uso de materiales compuestos reforzados con fibras en las aplicaciones ingenieriles y todo indica que este crecimiento continuará en el futuro.

Este crecimiento es debido al reemplazamiento de materiales tradicionales como los metales, ya que los materiales compuestos ofrecen propiedades superiores. Desde el punto de vista de la resistencia y la rigidez, los materiales compuestos reforzados con fibras tienen una ventaja clara, particularmente cuando se observa que su alargamiento de rotura es mucho menor que en los metales con resistencia comparable. Las ventajas de los materiales compuestos aparecen cuando se consideran el módulo de elasticidad por unidad de peso (módulo específico) y la resistencia por unidad de peso (resistencia específica).

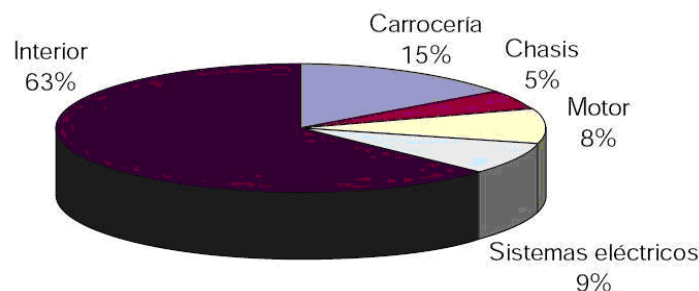


Figura 1.-Aplicación de los materiales compuestos en los automóviles [\[1\]](#).

Un mayor módulo específico y resistencia específica de los materiales compuestos significa que puede reducirse el peso de los componentes. Este es un factor de gran importancia en las piezas móviles, especialmente en todas las formas de

transporte donde las reducciones de peso dan como resultado mayor rendimiento y ahorro de energía.

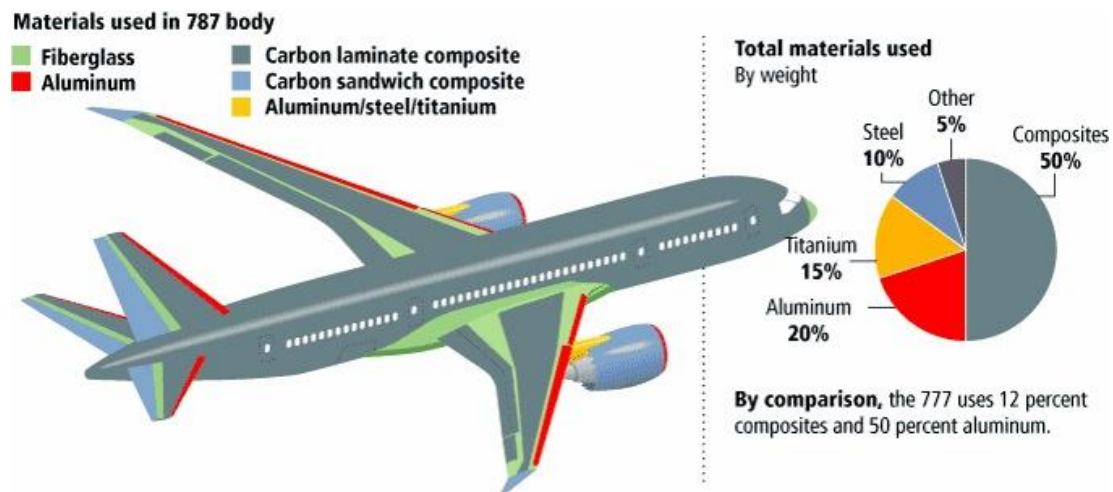


Figura 2.- Materiales compuestos utilizados en el Boeing 787 [2].

Aunque este tipo de materiales tienen grandes ventajas, existen algunos inconvenientes a la hora de trabajar con ellos. Un ejemplo de ello, es la dificultad que tienen para ser mecanizados debido a su forma y al comportamiento tan variable que tienen frente a este tipo de operaciones.

La escasa información que se tiene acerca de su comportamiento no permite realizar una comparación con el mecanizado de otros materiales como los metales. Además, hace que sea muy difícil comparar los datos obtenidos experimentalmente con la teoría. Por esto se debe seguir investigando su comportamiento, ya que cada vez es más frecuente que sustituyan a materiales muy utilizados a lo largo de la historia como son los metales.

Por ello, en el presente proyecto se estudia el comportamiento de dos tipos de materiales compuestos, uno dúctil y otro frágil, al mecanizarlos en corte ortogonal. El estudio se realiza mediante simulaciones en un programa de elementos finitos. Los materiales que se estudian están constituidos por una matriz epoxídica, diferenciándose en el tipo de refuerzo. Uno de ellos está reforzado con fibras de vidrio (dúctil) y otro con fibras de carbono (frágil). Siguiendo la nomenclatura de la bibliografía en este proyecto, estos materiales se denominan materiales GFRP (Glass Fibre Reinforced Plastic) y CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic).



Debido a su simplicidad y a que es el utilizado en la mayor parte de las simulaciones de la bibliografía, sólo se estudiará el mecanizado con corte ortogonal. Aunque en realidad las operaciones que se realizan a los materiales compuestos suelen ser con corte oblicuo, esta simplificación permite obtener una buena aproximación de su comportamiento.

OBJETIVOS

Los objetivos principales de este proyecto son la validación del modelo de elementos finitos propuesto para simular el mecanizado con corte ortogonal de GFRP y el análisis numérico de corte ortogonal de compuestos CFRP. Para la validación se han comparado los resultados obtenidos mediante simulaciones con los experimentales de la bibliografía.

Además se comparará el comportamiento de dos materiales distintos, uno frágil y otro dúctil, con lo que se obtendrán interesantes conclusiones que ayudarán en un futuro a elegir qué material es más adecuado según que aplicaciones.

La realización de estas simulaciones, tanto para validar el modelo de GFRP como para analizar numéricamente el modelo de CFRP son de gran utilidad para futuros estudios, ya que simplificarán análisis y ensayos experimentales posteriores y por tanto, reducirán su alto coste.

FASES DEL DESARROLLO

Tanto en el caso de GFRP como de CFRP se ha utilizado un modelo numérico generado en el programa de simulación ABAQUS. En este modelo se tienen parámetros fijos como los módulos de elasticidad, la resistencia del material y la mayoría de los parámetros de corte. Y parámetros que se han modificado en las distintas simulaciones con el objetivo de analizar la influencia de estos en el mecanizado, como la orientación de las fibras, el ángulo de desprendimiento y la energía de deformación.



Para hacer posible la comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones con los experimentales de la bibliografía, se han tomado de esta una serie de parámetros como la geometría de la herramienta, la profundidad de corte y la velocidad de corte.

Una vez realizada las simulaciones se obtienen como resultados los valores de las fuerzas de corte y avance y el daño de la matriz pudiendo estudiar después la relación que existe entre estos resultados y los parámetros que se han ido modificando.

MEDIOS EMPLEADOS

Hoy en día para simplificar los tiempos de ensayo y los costes de estos, se utilizan los llamados métodos de elementos finitos. Estos nos permiten realizar complicados cálculos de una manera más rápida y sencilla, lo que reduce la construcción de prototipos que tienen que ser corregidos de forma iterativa, ya que los resultados obtenidos se acercan bastante a la realidad.

Para realizar las simulaciones se utiliza ABAQUS que es un programa de simulación, que utiliza el método de elementos finitos. El modelo numérico definido es un modelo lagrangiano, en el cual la malla se mueve solidariamente con el material.

ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria del presente proyecto se divide de la siguiente forma:

Capítulo 1.- Estudio teórico: donde se definen qué son los materiales compuestos, sus características, tipos y aplicaciones más importantes, el mecanizado como concepto general, el mecanizado con corte ortogonal como caso particular y el mecanizado de materiales compuestos. Por último se realiza una explicación del método de elementos finitos.



Capítulo 2.- Estudio experimental: se hace un análisis del corte ortogonal experimental y de la simulación del corte ortogonal de los materiales compuestos a lo largo de toda la bibliografía.

Capítulo 3.- Modelo numérico: en este capítulo se define el modelo numérico utilizado para realizar las simulaciones, definiendo las propiedades de los materiales y herramientas utilizadas, así como los parámetros que han permanecido fijos y los que se han ido variando.

Capítulo 4.- Validación y resultados: donde se muestran todos los resultados obtenidos en las simulaciones tanto para los materiales reforzados con fibras de vidrio como para los reforzados con fibras de carbono, y se comparan con la bibliografía y entre ellos.



1.- ESTUDIO TEÓRICO

En este capítulo se realiza una introducción teórica sobre conceptos generales que deben conocerse para la realización y el entendimiento de este proyecto.

Este capítulo se divide en tres grandes bloques: materiales compuestos, mecanizado y elementos finitos. En el primero, se definen los materiales compuestos, sus características, los tipos que existen y las aplicaciones más importantes en la industria. En el segundo, se define el mecanizado como concepto general y se analiza un caso concreto, el corte ortogonal. Además, se expone el mecanizado de materiales compuestos. Por último, en el tercer bloque, se explica qué es el método de elementos finitos.

1.1.- MATERIALES COMPUESTOS

1.1.1.- ¿Qué es un material compuesto?

No existe una definición ampliamente aceptada sobre lo que es un material compuesto. La dificultad a la hora de definir este tipo de materiales, radica en las limitaciones de tamaño que imponemos a los componentes que forman el material.

Microestructuralmente un material compuesto puede definirse como aquel que tiene dos o más constituyentes diferentes (estructuras moleculares o fases). Por ello, muchos de los materiales considerados homogéneos son considerados como compuesto. Por el contrario, macroestructuralmente definimos un material compuesto como un material constituido por la combinación de diferentes materiales, difiriendo en su composición o forma con el objetivo de obtener propiedades y características específicas.

En ingeniería se entiende por material compuesto aquel sistema material integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes, que difieren en forma y composición química y que son insolubles entre sí. El rasgo



más característico de este tipo de materiales es que las propiedades del conjunto son mejores que las propiedades de sus constituyentes actuando por separado.

Las propiedades de un material compuesto dependen de las propiedades de los constituyentes, de la geometría y de la distribución de las fases. Uno de los parámetros más importantes es la fracción de volumen o la concentración del refuerzo. La distribución del refuerzo es una medida de homogeneidad, mientras que su orientación afecta a la anisotropía del sistema. Los materiales compuestos son materiales muy anisótropos, frágiles y sensibles a golpes.

Las ventajas de este tipo de materiales son:

- Alta relación resistencia-peso.
- Elevada rigidez.
- Alta resistencia a fatiga.
- Alta resistencia a corrosión.
- Alta resistencia dieléctrica.
- Alta flexibilidad.
- Mejoran las superficies aerodinámicas.
- Posibilidad de construir formas más o menos complejas.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Facilidad de fabricación (alta variedad de acabados).
- Estabilidad dimensional.

Naturalmente, en un material compuesto no pueden ser mejoradas todas estas propiedades, sino que algunas son mejoradas en detrimento de las restantes.

A pesar de haberse obtenido materiales con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunas limitaciones de los materiales compuestos como pueden ser:

- Las herramientas de cálculo no son tan conocidas ni están ampliamente extendidas como para los metales.
- No existe una tradición de diseño con estos materiales.



- Falta información sobre su comportamiento.
- El coste de la materia prima es elevado.
- En algunos casos, existen peligros para la salud en los procesos de fabricación.
- El peligro de fuego puede ser mayor en ciertos materiales.
- Los mecanismos de daño son complejos.
- Los procesos de fabricación son lentos y artesanales.

En los materiales compuestos podemos identificar dos fases: una discontinua y más rígida, que se denomina refuerzo, y otra menos rígida, continua, que se denomina matriz.

Las funciones del refuerzo son absorber las tensiones e incrementar la rigidez y la resistencia. Y las de la matriz transmitir tensiones entre los elementos del refuerzo, mantener el refuerzo en su posición y protegerlo del medio ambiente.

La resistencia de un material compuesto depende de las fibras utilizadas, su disposición y de la interfase Fibra/Matriz.

Los factores condicionantes a la hora de la elección de la fibra y matriz son:

- Una buena humectación.
- Que no haya reacción química entre fibra y matriz.
- Coeficientes de dilatación lo más parecidos posible.

Los principales procesos de fabricación de materiales compuestos son:

- Moldeo por centrifugación.
- Sustrato composite.
- Moldeo por compresión.
- Laminación continua.
- Enrollamiento de filamentos.
- Moldeo manual.
- Moldeo por inyección.



- Pultrusión.
- Moldeo por transferencia de resina (RTM).
- Aspersión.
- Bolsa de vacío.

1.1.2.- Clasificación.

Según el tipo de matriz o refuerzo, obtenemos distintas clasificaciones de los materiales compuestos.

- Según el tipo de matriz: distinguimos entre materiales compuestos con matriz polimérica, metálica o cerámica. Sus características más importantes se describen a continuación:

➤ ***Matriz polimérica:*** se caracteriza por su baja densidad, alta tenacidad, alta resistencia a la corrosión, baja resistencia mecánica, bajo coste, rapidez y sencillez de conformado. También hay que tener en cuenta a la hora de trabajar con este tipo de matrices, la influencia que tienen las condiciones medioambientales sobre los polímeros, tales como humedad, temperatura y radiación.

Existen dos tipos de matrices poliméricas: termoestables y termoplásticas. Las termoestables se caracterizan por estar formadas por cadenas reticuladas que hacen que la estructura adquiera una disposición permanente, provocando que la reacción sea irreversible y el polímero no pueda reciclarse. Ejemplos de este tipo de polímeros son el poliéster, resinas epoxi, fenólicas, etc.

Por otro lado, las termoplásticas están formadas por moléculas unidas por fuerzas débiles, lo que les confiere la propiedad de reblandecerse y poder ser moldeadas por la acción del calor, endureciéndose al enfriar, siendo todo ello reversible. Algunos ejemplos son el polipropileno, poliamida, polietileno...

Suelen emplearse como refuerzo fibras de vidrio, carbono, boro...

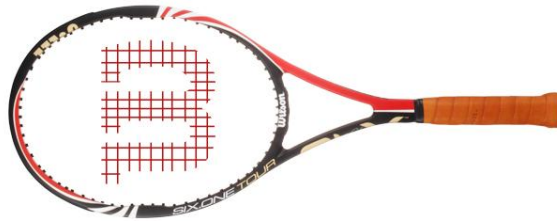


Figura 1.1.- Raqueta de tenis constituida por matriz polimérica [3].

➤ Matriz metálica: se caracteriza por dar una mayor capacidad resistente al material compuesto junto a una buena rigidez y tenacidad a fractura, una anisotropía poco pronunciada y un buen comportamiento a altas temperaturas, aunque hay que tener en cuenta la posible reactividad entre la matriz y el refuerzo. Este tipo de matrices están limitadas por su alta densidad y su dificultad de procesamiento y mecanizado.

Existen tres tipos: aleaciones de aluminio, titanio y cobre. La elección del refuerzo depende del valor de la temperatura de fusión de la matriz.

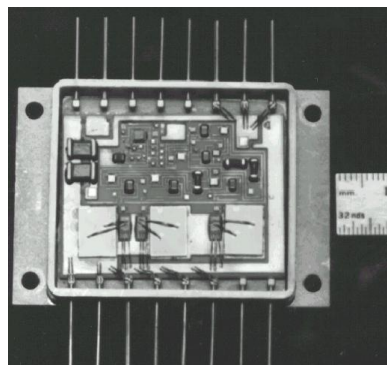


Figura 1.2.- Regulador de potencia a distancia formado por una matriz metálica reforzada con aluminio [4].

➤ Matriz cerámica: ofrece una gran resistencia a esfuerzos mecánicos y a altas temperaturas sin modificar su capacidad resistente. Por el contrario, su tenacidad es muy baja, al igual que sus conductividades térmica y eléctrica. Presentan altas resistencias a compresión, no así a tracción, por lo que lo más común es añadir fibras con alta resistencia a tracción. A veces, bajo niveles de carga tensionales capaces de romper la cerámica, se suelen utilizar refuerzos con

un alto módulo de elasticidad, ya que la elongación de la matriz no es suficiente para transferir una significativa cantidad de carga al refuerzo.

Existen tres tipos: alúmina, carburo de silicio y nitruro de silicio. Como refuerzos, se suelen utilizar materiales cerámicos y metálicos.



Figura 1.3.- Freno de disco constituido por materiales compuestos cerámicos [\[5\]](#).

- **Según el tipo de refuerzo:** tenemos materiales compuestos con refuerzos discontinuos (partículas, plaquetas o fibras cortas) o con refuerzos continuos (fibras largas, tejidos o laminados).

➤ **Materiales con refuerzos discontinuos:** un material se considera una partícula o plaqueta, cuando todas sus dimensiones son iguales. Y se considera fibra discontinua o fibra corta cuando tienen una longitud mayor que su sección transversal. Sus características son las siguientes.

Partículas: el aumento de propiedades no es muy elevado, el comportamiento mecánico suele ser isótropo, son los materiales menos costosos y de más fácil fabricación de todos los materiales compuestos y en materiales cerámicos pueden incrementar diferentes propiedades mediante varios mecanismos (dureza, tenacidad, resistencia mecánica...).

Las partículas cerámicas incrementan la rigidez y la temperatura de servicio de las matrices metálicas. Y las partículas dúctiles aumentan la tenacidad de fractura en matrices frágiles.

Plaquetas: el aumento de propiedades no es elevado, alcanzan mayores grados de compactación que las partículas y al ser aproximadamente bidimensional presentan igual resistencia en su plano.

Fibras cortas: la longitud de estas influye en las propiedades del material. Los materiales que poseen fibras tienen naturaleza anisótropa con excelentes propiedades en la dirección de las fibras.

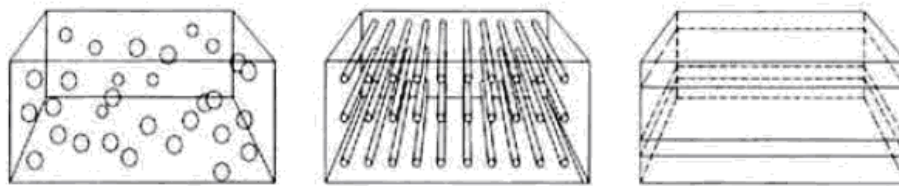


Figura 1.4.- Tipos de compuestos según el refuerzo. De izquierda a derecha: compuesto particulado, compuesto fibroso y compuesto laminado [6].

➤ **Materiales con refuerzos continuos:** un material se considera fibra continua o fibra larga cuando tienen una longitud mucho mayor que su sección transversal. Laminado, cuando están formados por dos o más láminas que tienen dos de sus dimensiones mayores que la tercera. Y tejido o estructuras sándwich, cuando la matriz forma un esqueleto que es relleno de un segundo material. Sus características más destacadas son las siguientes.

Fibras largas: aumentar la longitud de las fibras no influye en las propiedades del material.

Laminados: cada lámina puede ser un material (fibra corta, fibra larga o tejido de dos dimensiones). Los laminados se forman a partir de la repetición de un número finito de láminas con diferentes orientaciones.

Tejidos: presentan una elevada rigidez y resistencia a esfuerzos de flexión y una alta capacidad de aislamiento.

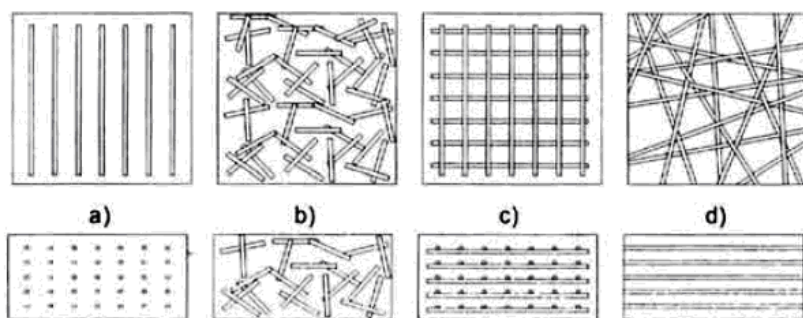


Figura 1.5.- Tipos de compuestos fibrosos [6].

1.1.3.- Aplicaciones.

Los materiales compuestos nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. Y la importancia, bajo el punto de vista de la ingeniería, que tienen los materiales compuestos es que dos o más materiales distintos se combinan para formar un material con propiedades superiores, o de algún modo más importantes que las de sus componentes considerados individualmente.

Históricamente el hombre ha combinado materiales para obtener otros que se adapten a un fin específico. Por ejemplo, en la industria del transporte son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste. Estas propiedades rara vez se dan juntas en los materiales convencionales.

Tabla 1.1.- Distintas aplicaciones de los materiales compuestos en la industria.

INDUSTRIA	EJEMPLOS
Aeronáutica	Alas, fuselaje, tren de aterrizaje, palas de helicóptero
Automóviles	Piezas de carrocería, alojamientos de los faros, parrillas, parachoques
Náutica	Cascos, cubiertas, mástiles
Química	Conducciones, recipientes, recipientes de presión
Mobiliario y equipamiento	Estanterías, armazones, sillas, mesas, escaleras
Eléctrica	Paneles, aislantes, caja de interruptores
Deportes	Cañas de pescar, palos de golf, piscinas, esquís, canoas

En la actualidad los compuestos de resina reforzados con fibras han permitido conseguir elevadas relaciones resistencia/peso y rigidez/peso permitiéndoles su uso en importantes aplicaciones sensibles al peso, tales como aeronaves y vehículos espaciales.



Figura 1.6.- Ejemplos de algunas aplicaciones de los materiales compuestos en la industria [\[7\]](#).

Por dichas razones, este tipo de materiales son motivo de interés para los estudios de este proyecto. A continuación se destacan los tipos de matrices y refuerzos más comunes.

La matriz más empleada en materiales compuestos es la *resina epoxi* debido a su facilidad de procesamiento (a baja presión y temperatura), buena adhesión a distintos tipos de sustratos, baja concentración en el proceso de curado, mejora tras el curado de las propiedades mecánicas, resistencia a la fatiga, resistencia térmica y química y capacidad de deformación antes de fallar. Aunque son sensibles a la humedad en estado curado y no curado, son menos sensibles a la humedad y a otros efectos medioambientales que las resinas poliéster y tienen mejores propiedades mecánicas. En estado curado tienen ventajas especiales frente a las resinas poliéster, como las buenas propiedades de tensión de rotura y más baja contracción después del curado. Son las resinas de mayor coste, pero su uso es justificado debido a las buenas propiedades que presentan.

Tabla 1.2.- Comparación de las propiedades de las matrices poliéster y epoxi [8].

PROPIEDAD	POLIÉSTER	EPOXI
Tensión de rotura (MPa)	40 - 90	55 – 130
Módulo de elasticidad a tracción (GPa)	2,0 - 4,4	2,8 – 4,2
Límite elástico a flexión (MPa)	60 - 160	125
Resistencia al impacto (J/m) (ensayo de Izod de barra dentada)	10,6 - 21,2	5,3 – 53
Densidad (g/cm ³)	1,1 - 1,46	1,2 – 1,3

Los refuerzos que se utilizan generalmente con este tipo de matrices son las fibras de vidrio, aramida y carbono.



Figura 1.7.- De izquierda a derecha: fibra de carbono, fibra de aramida y fibra de vidrio [9].

Se utilizan como refuerzo las fibras debido a que exhiben un mejor comportamiento desde el punto de vista de la rigidez y de su resistencia, que los mismos materiales en forma maciza. Este hecho está demostrado por las fibras de vidrio que tienen una resistencia mecánica mucho más elevada que la del vidrio en forma de lámina (3-5GPa frente a pocos MPa). Esto básicamente se debe a que en las fibras los cristales se alinean con el eje de la misma, a diferencia de la ubicación al azar de los cristales que se tiene en materiales macizos.

La explicación a este hecho es que disminuye la probabilidad de encontrar defectos en la escala macro-microscópica que son los principales responsables de que aparezca la grieta y la fractura. Esto fue demostrado en 1920 por Griffith al ensayar con

barras de vidrio de diámetro progresivamente inferior. Por esto, las fibras presentan mejores prestaciones mecánicas, porque la probabilidad de encontrar defectos disminuye y además se anclan en la matriz que las rodea uniformemente. Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas son aconsejables las fibras de diámetro lo menor posible. Sin embargo, por razones de coste y seguridad se limita a 1 μm de diámetro, ya que fibras menores (con longitudes también menores) son más caras y se pueden liberar en el mecanizado de las piezas originando partículas fibrosas en suspensión (como los asbestos) que pueden causar problemas de salud.

En la siguiente tabla se pueden observar algunas de las propiedades de algunas fibras en comparación con materiales conocidos.

Tabla 1.3.- Comparación de las propiedades de algunos tipos de fibras [8].

Materiales	Peso específico, ρ (kN/m^3)	Tensión límite en tracción, $\sigma_{\text{lim}} t$ (GN/m^2)	$\sigma_{\text{lim}} t/\rho$ 10^3 m	Módulo elástico, E (GN/m^2)	E/ρ 10^6 m
Aluminio	26.3	0.62	24	73	2.8
Titanio	46.1	1.9	41	115	2.5
Acero	76.6	4.1	54	72	2.7
Vidrio E	25.0	3.4	136	86	2.9
Vidrio S	24.4	4.8	197	190	3.5
Carbono	13.8	1.7	123	190	14
Berilio	18.2	1.7	93	300	16
Boro	25.2	3.4	137	400	16
Grafito	13.8	1.7	123	250	18

La fibra de vidrio es la más utilizada, debido principalmente a su bajo coste. La aramida y el carbono son fibras muy resistentes y de baja densidad, su ámbito de uso es en aplicaciones aerospaciales a pesar de su coste elevado.

Las principales propiedades de la *fibra de vidrio* son un buen aislamiento térmico, es inerte ante ácidos y soporta altas temperaturas. Como se ha comentado antes su bajo coste combinado con estas propiedades le han dado la popularidad en muchas



aplicaciones industriales. Las características del material permiten que sea moldeable con mínimos recursos.

Las *fibras de carbono* se caracterizan por ser las fibras con mejores propiedades mecánicas combinadas con una densidad baja. Esto puede observarse en la tabla que se muestra a continuación, donde se comparan algunas propiedades más comunes de las fibras de vidrio tipo E, las fibras de carbono y las de aramida tipo Kevlar. Además es un material anisótropo y cuenta con una baja resistencia al impacto, gran estabilidad dimensional asociada a un coeficiente de dilatación muy bajo, conductividad térmica elevada, buena resistencia a la fatiga y puede favorecer la corrosión galvánica. La resistencia mecánica es mayor que en las fibras de vidrio.

Tabla 1.4.- Propiedades de algunas fibras de refuerzo de matrices plásticas [8].

Propiedad	Vidrio E (HTS)	Carbono (HT)	Aramida (Kevlar 49)
Tensión de rotura (MPa)	2410	3100	3617
Módulo de tensión (GPa)	69	220	124
Alargamiento a la rotura (%)	3,5	1,4	2,5
Densidad (kg/m ³)	2,54	1,75	1,48

En la siguiente figura, se comparan los diagramas típicos tensión-deformación de varios materiales reforzados con fibras, pudiendo observarse que la resistencia a la tracción de las fibras varía desde 1720 a 3440 MPa, mientras el porcentaje de deformación a la fractura oscila desde el 0,4 al 4 %. El módulo de elasticidad de estas fibras oscila desde 68,9 a 414 GPa. Las fibras de carbono proporcionan la mejor combinación de alta resistencia, alta rigidez (módulo) y baja densidad, pero tienen poca elongación lo que significa que no se pueden deformar mucho. La fibra de aramida Kevlar 49 posee una combinación de alta resistencia a la tensión, alto módulo (no tan elevado como la fibra de carbono), baja densidad y alto alargamiento (resistencia al impacto). Las fibras de vidrio poseen tensión de rotura y módulos más bajos mientras su densidad es más alta.

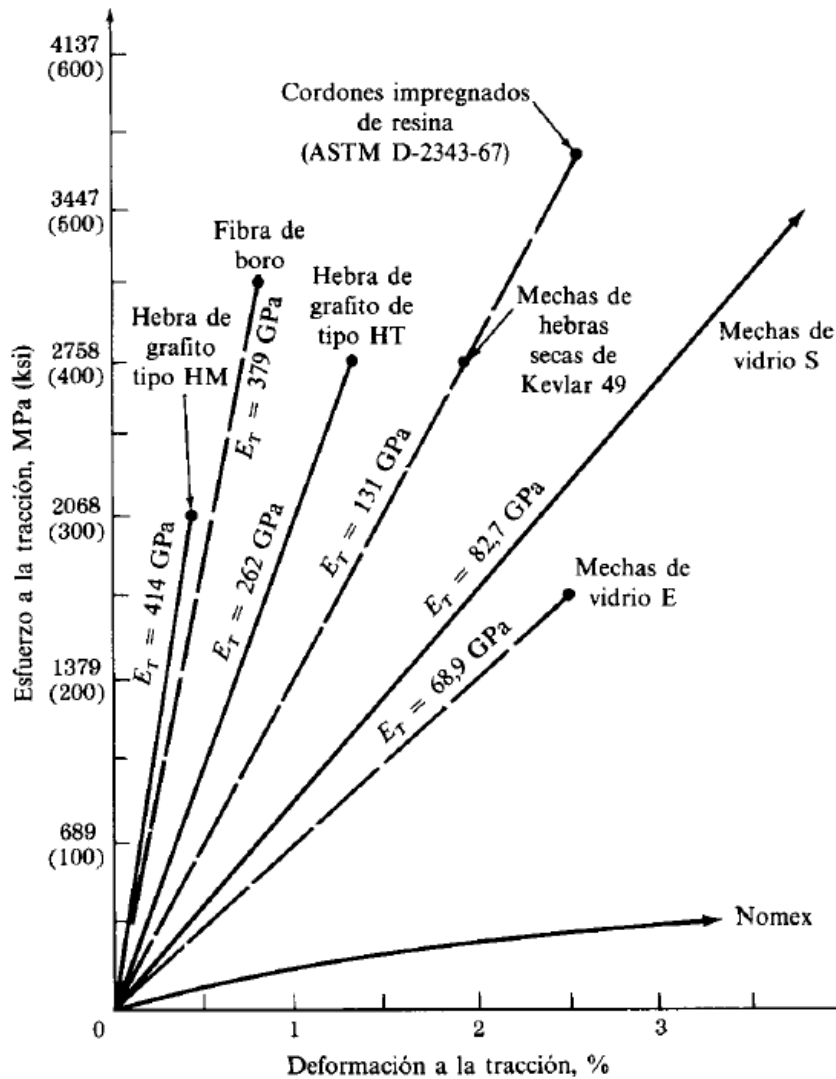


Figura 1.8.- Comportamiento de σ - ϵ de varios materiales reforzados con fibras [10].

Las propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras están íntimamente relacionadas con la disposición de las mismas en la matriz y de su cantidad, la cual debe controlarse exactamente en el proceso de fabricación.

Existen gran cantidad de propiedades mecánicas que dependen enormemente de la disposición y distribución de las fibras. Y esto último está intrínsecamente relacionado con la longitud y diámetro de las fibras, así como, con la fracción en volumen de fibras y su alineamiento y empaquetamiento. Es importante caracterizar esos parámetros para un procesamiento efectivo de los materiales compuestos y para el diseño y manufactura eficiente de los componentes hechos con materiales compuestos.

1.2.- MECANIZADO.

Se denomina fabricación por mecanizado o arranque de virutas al proceso que se realiza en las piezas para obtener las dimensiones y naturaleza superficial que se desea en las mismas. Como su nombre indica este proceso se realiza mediante la eliminación de partes del material llamadas virutas por medios mecánicos y con herramientas de filo.

Los procesos de fabricación por mecanizado se clasifican en base al tipo de filo de la herramienta, de modo que hay procesos de arranque con filos geoméricamente determinados y con filos no determinados.

Dentro de estos procesos de arranque de viruta el corte puede ser ortogonal u oblicuo. Estos se diferencian en el ángulo de inclinación del filo con respecto a la dirección del desplazamiento relativo entre la herramienta y la pieza. En el caso del corte ortogonal el filo es perpendicular a esta dirección y en el corte oblicuo existe un cierto ángulo.

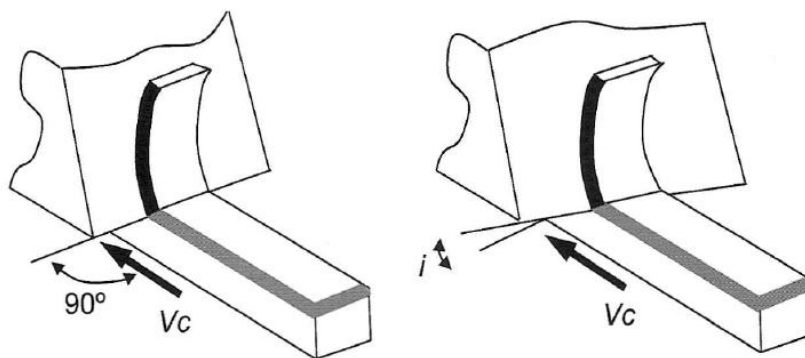


Figura 1.9.- Corte ortogonal y oblicuo, con inclinación i [11].

Las operaciones más habituales en los materiales compuestos, como el fresado o taladrado se realizan mediante corte oblicuo, ya que las herramientas utilizadas pueden ser discretizadas como la suma de filos de corte rectos, donde cada uno de ellos puede considerarse como una herramienta en una operación de corte oblicuo como puede observarse en la siguiente figura:

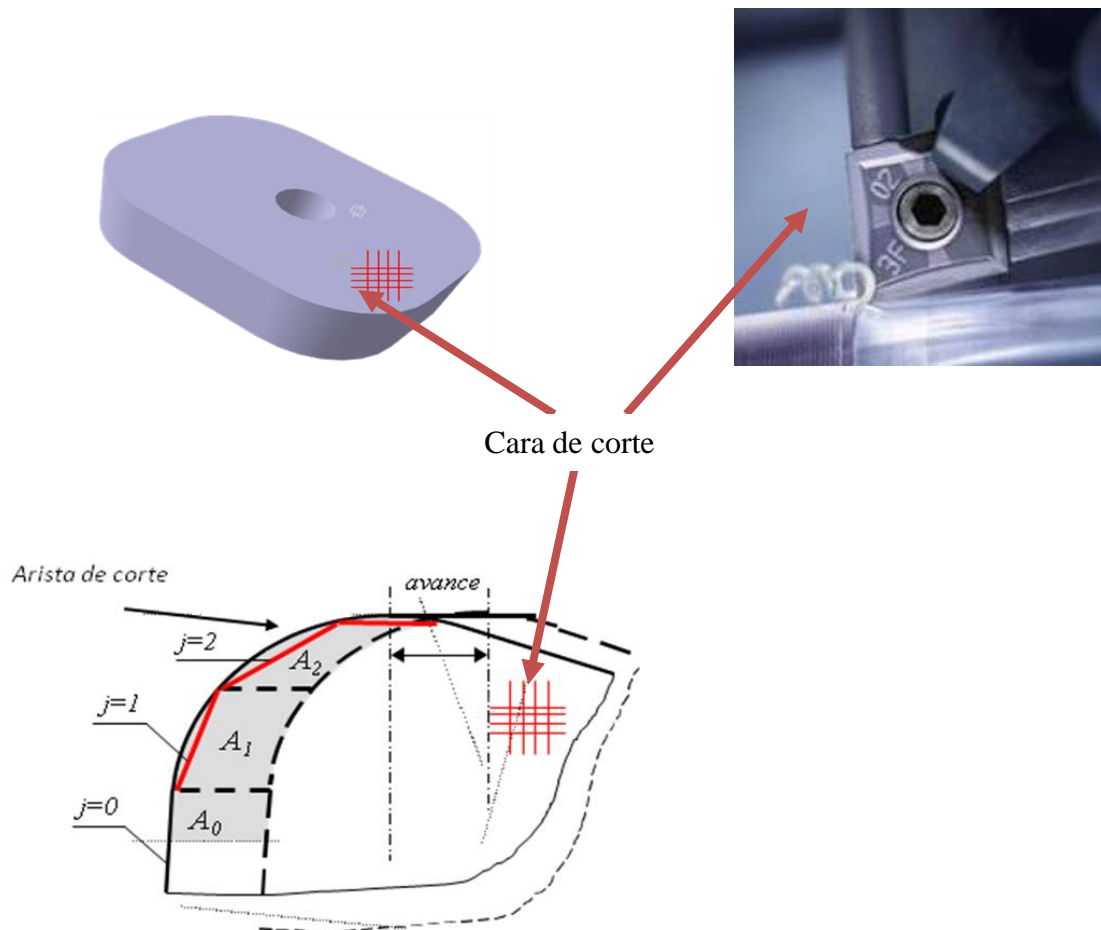


Figura 1.10.- Discretización de una herramienta como la suma de filamentos de corte rectos.

El inconveniente a la hora de considerar un estudio con corte oblicuo es que las fuerzas de corte tienen tres componentes, en lugar de las dos del corte ortogonal. Las relaciones entre ellas dependen de la geometría de la herramienta, el ángulo de cizallamiento y del ángulo de filo, y esto dificulta su análisis.

En el corte oblicuo es necesario hacer el estudio espacial de la geometría de las herramientas de corte, teniendo en cuenta dos hechos de importancia:

- Las herramientas cortan en muchas operaciones de torneado, fresado y taladrado con dos filos simultáneamente (primario y secundario).
- Hay herramientas de filos curvos, como las fresas de cabezas esféricas o tóricas, donde la inclinación del filo es variable en cada punto de corte.

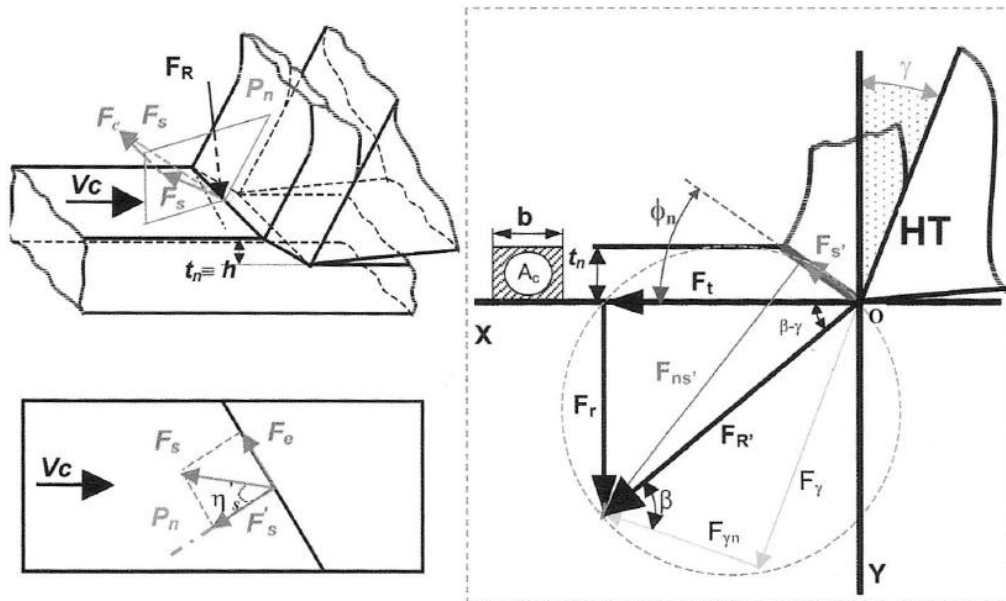


Figura 1.11.- Complejidad geométrica del corte oblicuo. Derecha: descomposición de las fuerzas en un plano perpendicular al filo [11].

Por contra, el corte ortogonal es el caso más simplificado de proceso de arranque de material y es el utilizado en las simulaciones en el mecanizado de estudios numéricos. Su simplicidad y utilidad permiten obtener información acerca de variables difíciles de medir y se puede considerar una buena aproximación ya que el valor del ángulo de un corte oblicuo no suele superar los 15° .

Por estos motivos, éste será el tipo de corte utilizado en el presente proyecto y será explicado con más detalle en el siguiente punto de este capítulo.

Para llevar a cabo el mecanizado se deben efectuar movimientos relativos entre la pieza y la herramienta, para que se produzca una interacción entre ambas y se realice el arranque de viruta. Dichos movimientos son:

- Movimiento de corte: aquel que sin movimiento de avance, solo arranca viruta durante una revolución o durante una carrera, dependiendo de si el movimiento es circular o rectilíneo respectivamente.
- Movimiento de avance: al combinarse con el movimiento de corte hace posible el arranque continuo de virutas.

- Movimiento de penetración: determina la profundidad de corte y por tanto el espesor de la viruta que se arranca.

Para que el mecanizado sea lo más efectivo posible es necesario ajustar una serie de parámetros llamados parámetros de corte:

- Velocidad de corte: velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la pieza en la dirección y sentido del movimiento de corte. En los procesos de torneado y fresado se define como:

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000},$$

donde V_c [m/min], d (diámetro de la pieza en torneado y de la herramienta en fresado) [mm], n (revoluciones de la pieza en torneado y de la herramienta en caso de fresado)[r.p.m].

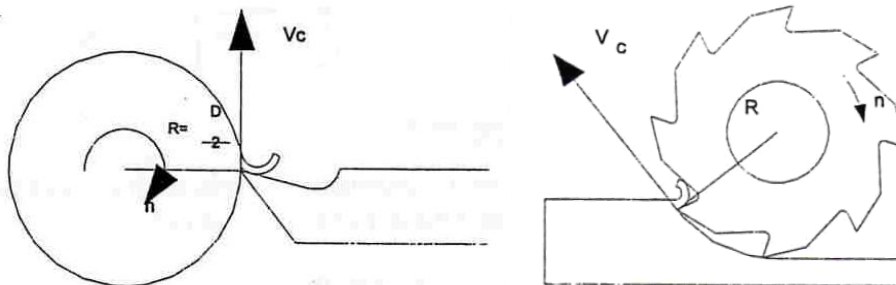


Figura 1.12.- Velocidad de corte en torneado y fresado [12].

- Avance: es el camino recorrido por la herramienta en cada revolución o carrera.

$$V_a = a n \text{ [mm]}$$

- Profundidad en el corte: se define como la distancia que penetra la herramienta en la pieza. [mm]

- Sección de la viruta: que se calcula a partir de la profundidad en el corte como:

$$S = a p \text{ [mm}^2\text{]}$$

La viruta se separa del material por la combinación de tres procesos:

- Cortadura o recalcado: el material es desplazado por el filo, que va penetrando en él.
- Corte: se corta una parte de viruta debido a que el esfuerzo cortante es mayor que la resistencia al corte del material.
- Fluencia o salida de viruta: dependiendo de cómo sea el material se produce bien el desprendimiento de la viruta, bien la unión de unas con otras, formando viruta continua.

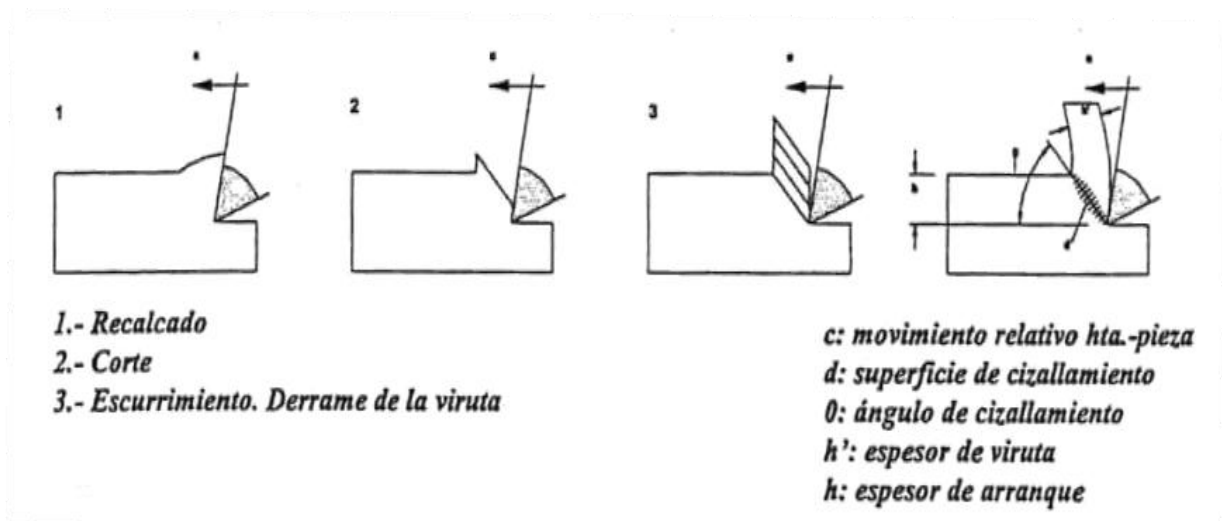


Figura 1.13.- Proceso de arranque de viruta en el mecanizado [12].

La viruta se puede clasificar en tres tipos según la forma de salida:

- Viruta discontinua o arrancada: aparece en materiales frágiles, duros y quebradizos y con bajas velocidades de corte. La evacuación se realiza fácilmente al desprenderse según se va produciendo.

- Viruta continua o plástica: se produce en materiales dúctiles, con pequeños avances y gran velocidad de corte. Este tipo de viruta es molesta y se intenta evitar.

Una solución frente a la viruta continua es el rompevirutas que suele venir incorporado a la geometría de filo de la herramienta.

Su función es obligar a la viruta a salir con un radio más pequeño provocando su ruptura por tensión.

- Viruta semicontinua o cortada: en materiales tenaces y bajas velocidades de corte.

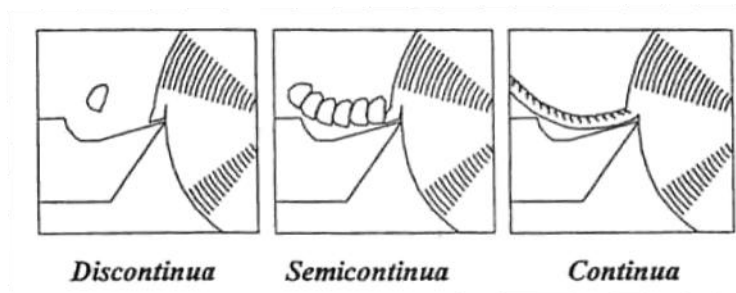


Figura 1.14.- Diferentes tipos de viruta en el mecanizado [\[12\]](#).

En el caso de los materiales compuestos estudiados en este proyecto, se tiene una pulverización total de la viruta para los materiales reforzados con fibras de carbono, debido a su fragilidad, y pequeñas virutas para los materiales reforzados con fibras de vidrio, por ser un material más dúctil que el carbono.

Un fenómeno relacionado con los procesos de formación de viruta es el filo recrecido. Éste aparece normalmente cuando se trabaja con materiales dúctiles y a bajas velocidades. Hay que evitarlo, ya que provoca acabado de mala calidad y vibraciones debido a que se generan altas presiones en la zona de contacto viruta-herramienta produciéndose una soldadura de partículas de viruta con la cuchilla. Aumentar la velocidad de corte, lubricar, utilizar materiales de herramienta adecuados, como metales duros o cerámicas, o aumentar el ángulo de desprendimiento son algunas de las soluciones más comunes y efectivas que se toman para acabar con el filo recrecido.

1.2.1.- Corte ortogonal

A continuación, se muestra un esquema donde se pueden ver los parámetros más importantes de una herramienta a la hora de realizar el corte ortogonal de una pieza.

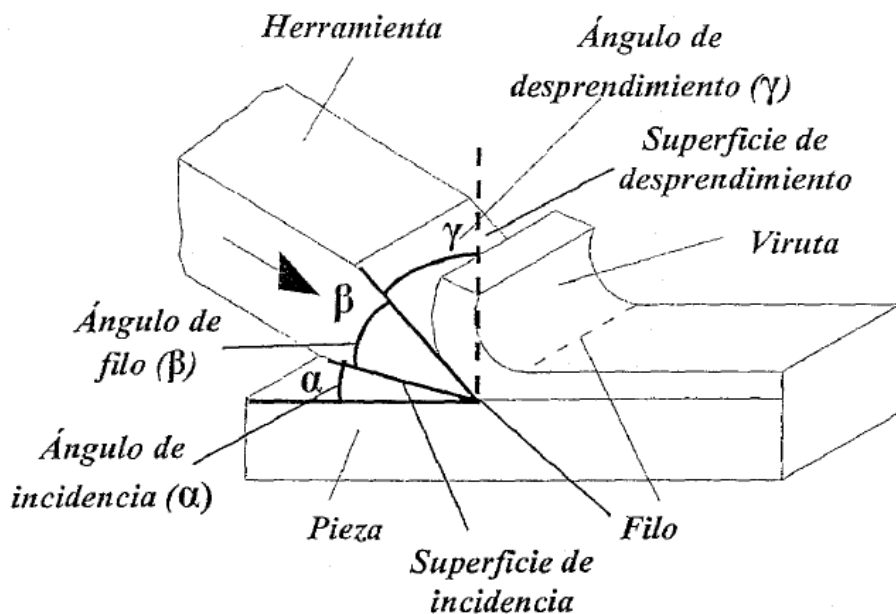


Figura 1.15.- Esquema herramienta-pieza. Parámetros más importantes [\[12\]](#).

Los elementos característicos de una herramienta en el corte ortogonal son:

- El filo o arista cortante, que como su nombre indica es la arista que corta el material.



- La superficie de desprendimiento, que es la cara de la herramienta sobre la que desliza el material desprendido.

- La superficie de incidencia, que es la cara de la herramienta que queda frente a la superficie trabajada de la pieza.

Los ángulos que definen la posición de las superficies anteriores son:

- Ángulo de incidencia, constituido por la superficie de incidencia y el plano que contiene al filo y a la velocidad de corte.

- Ángulo de filo o herramienta, constituido por las superficies de incidencia y desprendimiento.

- Ángulo de desprendimiento, constituido por la superficie de desprendimiento y el plano normal a la velocidad de corte y que contiene al filo.

Si el ángulo de incidencia es muy pequeño, el contacto con la pieza aumenta, produciéndose un roce excesivo, un aumento de temperatura y por tanto, un desgaste más rápido de la herramienta. Por el contrario, si es demasiado grande, se debilita el filo. Para obtener un ángulo de incidencia correcto hay que tener en cuenta el material de la pieza y de la herramienta.

Si el ángulo de desprendimiento es grande, la herramienta penetra y corta bien, dando un mejor acabado superficial, pero debilitando mucho el filo. Si éste es pequeño, favorece la resistencia de la herramienta, pero la energía consumida y el calentamiento de la herramienta aumentan. Para obtener el ángulo de desprendimiento hay que tener en cuenta la resistencia del material de la herramienta, el material a mecanizar y el avance. El ángulo de desprendimiento adecuado será el mayor que pueda soportar la herramienta sin romperse.

En función del valor de este último ángulo, si es mayor o menor que cero, las herramientas se clasifican en herramientas con geometría positiva y herramientas con geometría negativa respectivamente.



En el proceso de arranque de viruta intervienen tres velocidades:

- La velocidad de corte, que es la velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la pieza en la dirección y sentido del movimiento de corte.

- La velocidad de deformación o cizallamiento, que es la velocidad de rotura de la viruta.

- La velocidad de viruta respecto a la herramienta, que es la velocidad de salida de la viruta.

Si la velocidad de corte es demasiado baja, la productividad es muy pequeña y por el contrario, si es demasiado alta, la herramienta se desgasta rápidamente. La elección de una velocidad de corte adecuada se realiza teniendo en cuenta varios factores entre los que se destacan, el material de la pieza, el material de la herramienta, la sección de viruta, la refrigeración, el tipo de construcción de máquina, etc. Normalmente los catálogos de los fabricantes indican valores orientativos de velocidades de corte para cada material.

El *ángulo de cizallado* es el ángulo según el cual se corta el material para formar la viruta.

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\cos \gamma}{Cr - \operatorname{sen} \gamma}, \text{ donde } Cr \text{ es el factor de recalcado.}$$

Existe una relación entre la relación entre espesor de viruta deformada y sin deformar (factor de recalcado) y el ángulo de cizallamiento. Esta relación permite obtener las velocidades de deformación y de salida de viruta.

$$V_s = V_c + V_v$$

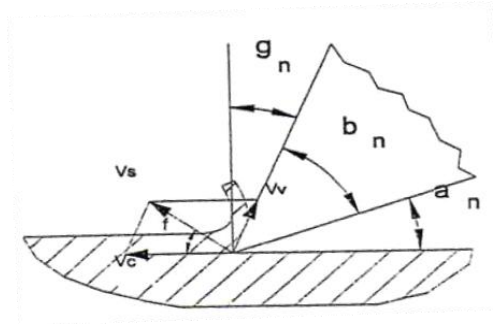


Figura 1.16.- Velocidades en el corte ortogonal [12].

Las fuerzas de reacción del material a mecanizar no actúan en el filo, sino en una zona más alejada de él que es mayor o menor según lo sea el ángulo de desprendimiento.

Una vez comenzado el mecanizado tenemos las siguientes fuerzas:

- F_c = fuerza de corte, que nos permitirá conocer la potencia necesaria.
- F_d = fuerza de deslizamiento, permite calcular las tensiones cortantes en el plano donde se produce la viruta.
- F_r = fuerza de rozamiento entre viruta y herramienta.

$$R = F_c + N_c = F_d + N_d = F_r + N_r$$

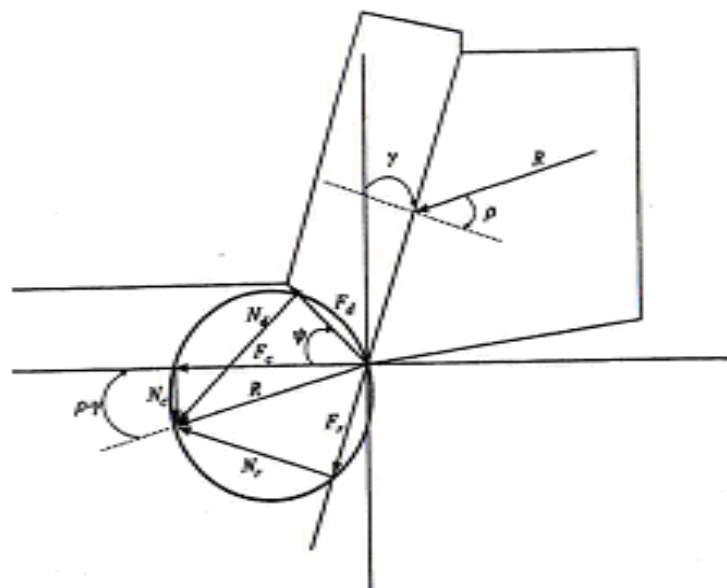


Figura 1.17.- Fuerzas en el corte ortogonal [13].



$$F_c = R \cos(\rho - \gamma)$$

$$N_c = R \sin(\rho - \gamma)$$

$$F_d = R \cos(\psi + \rho - \gamma)$$

$$N_d = R \sin(\psi + \rho - \gamma)$$

$$F_r = R \sin \rho$$

$$N_r = R \cos \rho$$

Relacionando la fuerza de rozamiento con la fuerza de avance se puede obtener el *coeficiente de rozamiento* entre viruta y herramienta que viene dado por:

$$\mu = F_r / N_r$$

1.2.2.- Mecanizado de los materiales compuestos

Los materiales compuestos se fabrican casi con su forma final, por lo que se necesitan pocas operaciones de mecanizado posteriores. Entre ellas destacan el fresado que se realiza para ajustar el material a su contorno final, y el taladrado para su posterior unión a otros elementos, que pueden ser materiales compuestos o no. Con frecuencia, este tipo de operaciones resultan muy complicadas por lo que es conveniente investigar el comportamiento de este tipo de materiales en los distintos procesos de mecanizado.

Las principales dificultades en el mecanizado de los materiales compuestos son:

- Coexistencia de un material blando (matriz) con uno resistente y muchas veces abrasivo. El éxito de la operación depende generalmente de la naturaleza de las fibras y poco de la naturaleza de la matriz. Por ejemplo, las fibras tipo Kevlar son muy difíciles de mecanizar.



- Un material heterogéneo y anisótropo puede ser fácilmente mecanizado en un sentido, pero no en el otro. Así, en el acabado de un contorno cerrado unos lados pueden quedar perfectos y sin embargo los transversales muy dañados.
- Existe la posibilidad de dañar el material, produciendo su delaminación, quemándolo o rompiendo su estructura.

Entre estos problemas, este último es el más importante, dado que el material compuesto posee inicialmente un elevado valor añadido debido a su proceso de fabricación, a su conformado y a su curado, justo antes de llegar al mecanizado. Para evitar los problemas citados anteriormente se toman las siguientes medidas:

- Para evitar problemas de ataque químico al material por parte de la taladrina, los materiales compuestos se mecanizan en seco, absorbiendo las virutas y polvo por medio de aspiradores de alta potencia instalados en las máquinas.
- El rozamiento más la ausencia de fluido de corte, pueden provocar altas temperaturas que degradan el material. Para evitar el quemado se debe mecanizar con una herramienta adecuada y refrigerar la zona con aire a presión.
- Pueden existir problemas de aparición de microgrietas, sobretodo en los materiales compuestos con matriz metálica. Para evitarlo se debe mecanizar con herramientas muy afiladas evitando condiciones que produzcan un excesivo calentamiento del material.
- Se debe evitar el deterioro mecánico que conduce a la delaminación del compuesto, al astillado de las fibras o a la aparición de la pelusilla. Para ello se debe mecanizar en una dirección acorde con la direccionalidad de las fibras, utilizando herramientas de filos muy definidos. En el caso del taladrado se debe estudiar con especial cuidado este fenómeno en la entrada y la salida de la broca.

Las operaciones que se realizan en su mayoría sobre los materiales compuestos son el fresado y el taladrado. No es muy frecuente efectuar un torneado, salvo en el caso



de materiales compuestos con matriz metálica. También suelen aplicarse procesos no convencionales de corte, como el corte por láser o por chorro de agua a alta presión.

- *Materiales compuestos con matriz polimérica:* las operaciones más habituales son el serrado, fresado y recorte de bordes (trimming), taladrado, corte de paneles y esmerilado de bordes.

Entre los procesos no convencionales se encuentran el corte por láser, limitado por el problema térmico, y el corte abrasivo con agua a presión, el cual da óptimos resultados en compuestos de fibra de carbono.

Las operaciones más habituales en los paneles de sándwich son el corte con sierra y el taladrado con trepanador.

- *Materiales compuestos con matriz metálica:* se suelen emplear procesos de fresado, torneado y métodos menos convencionales como la electroerosión.

Es importante recalcar que el mundo de los materiales compuestos es muy amplio y cada tipo poseerá su propia problemática en cuanto a mecanizado, ya que cada uno de ellos puede ser muy diferente a los demás y su mecanizado por tanto también.

Aunque muchas investigaciones se dirigen a la comprensión del mecanizado de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras (FRP), aún falta mucho para entenderlo, ya que el problema es mucho más complejo que el mecanizado de metales, debido a las respuestas del material en la operación de mecanizado. Por otra parte, la existencia de bibliografía publicada en el campo de mecanizado de materiales compuestos es mucho menor en comparación con el mecanizado de metales. Incluso la investigación fundamental sobre el mecanismo de formación de virutas es casi insignificante, ya que no existe ningún modelo para poder correlacionar las observaciones experimentales con la teoría.

1.3.- ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos (MEF) es un método de gran utilidad para resolver problemas ingenieriles, físicos, etc. Con MEF se pueden resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Reduce el tiempo de desarrollo y el elevado coste económico que suponía el realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, ya que el lugar de esto, se construye un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo.

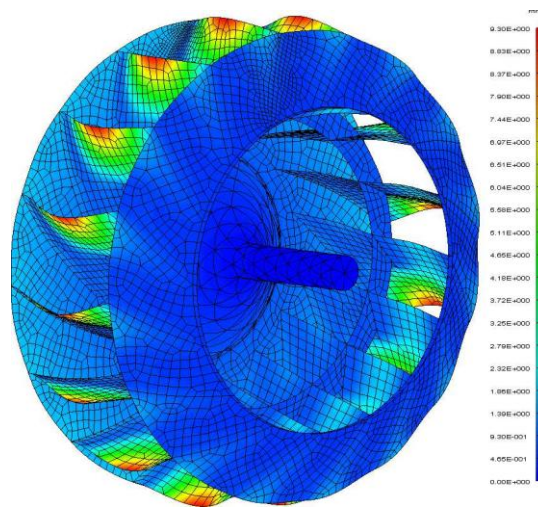


Figura 1.18.- Análisis de las deformaciones de un rodete en operación, simulado a 900 rpm, mediante el método de elementos finitos [14].

Aunque utilizando MEF nos acercamos bastante al diseño óptimo, este no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas que se consideran. Por lo tanto, se siguen necesitando los prototipos, pero en menor número.

El método de elementos finitos es conocido desde hace mucho tiempo y surge del empleo de métodos de discretización espacial y temporal y la aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas ingenieriles o físicos, que ya utilizaban los egipcios para determinar el volumen de las pirámides.

El método de los elementos finitos como formulación matemática es relativamente nuevo y el desarrollo de los elementos finitos tal y como se conoce hoy en

día ha estado ligado al cálculo estructural fundamentalmente en el campo aeroespacial. En las últimas décadas como consecuencia de los avances informáticos, que han permitido que los usuarios pudieran tener acceso a multitud de programas que realizan cálculos con elementos finitos, este método ha sufrido un gran desarrollo. A pesar de que este método está muy extendido y al alcance de cualquier usuario, para garantizar unos buenos resultados que se ajusten a la realidad, se debe tener un gran conocimiento del material con el que se trabaja y de los principios del MEF.

Hoy en día el método se encuentra en una fase de gran expansión ya que es ampliamente utilizado en la industria y por ello se siguen realizando numerosas investigaciones que permitan mejorarlo. Actualmente y gracias a este método, es posible la conexión entre las técnicas de análisis estructural, las técnicas de diseño (CAD), y las técnicas de fabricación.

El funcionamiento de este método se basa en la división de un problema continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del problema continuo son las mismas que regirán el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), gobernado por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

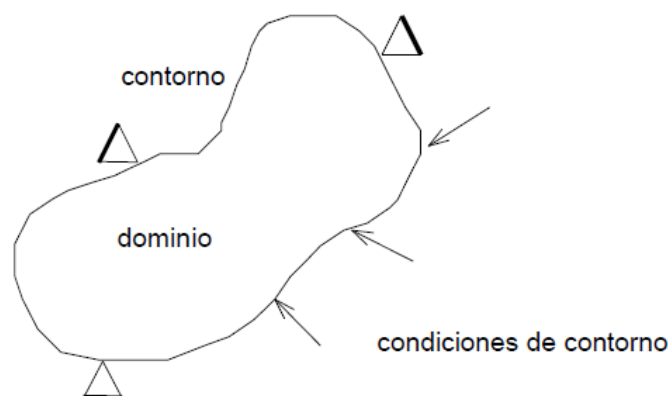


Figura 1.19.- Esquema sistema a analizar por MEF: dominio, contorno, condiciones de contorno [15].



El método de los elementos finitos considera a la hora de resolver el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos, si el problema es lineal, en líneas, si es bidimensional, o en superficies en caso de que sea tridimensional. Así, se consigue que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide.

Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se conforman las incógnitas fundamentales del problema. Estas incógnitas se denominan grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo.

Planteando la ecuación diferencial que rige el comportamiento del problema continuo para el elemento, se llega a fórmulas que relacionan el comportamiento en el interior del mismo con el valor que tomen los grados de libertad nodales. Este paso se realiza por medio de unas funciones llamadas funciones de interpolación, ya que éstas interpolan el valor de la variable nodal dentro del elemento.

El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación de las matrices mediante ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento se ensamblan y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas, lineales o no, que resolviéndolas nos proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema.

Resumiendo, las actividades que lleva a cabo un programa de elementos finitos para realizar un cálculo son:

Preproceso: en el que se define la geometría de la herramienta CAD, en 2D o 3D, se genera la malla, se asignan las condiciones de contorno y las propiedades de los materiales.

Cálculo: consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno seguido del otro, y cuya entrada depende del resultado del preproceso.



Postproceso: se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos en la fase de cálculo y se representa gráficamente la distribución que se quiere analizar.

En este proyecto se ha utilizado como software ABAQUS, el cual sigue el método de elementos finitos para la resolución de problemas y realiza todas estas actividades de preproceso, cálculo y postproceso. ABAQUS está compuesto por varios programas, siendo ABAQUS/Explicit el utilizado para el presente proyecto. ABAQUS/Explicit permite realizar un análisis dinámico explícito que computacionalmente es más eficiente que un análisis dinámico implícito para modelos grandes con respuesta dinámica relativamente corta. Este tipo de análisis es usado en problemas cuasi-estáticos con condiciones de contacto complicadas.

El modelo que se ha elegido para este proyecto es un modelo lagrangiano, en el cual la malla se mueve solidariamente con el material.



2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL

A lo largo de este capítulo se realiza un análisis del corte ortogonal y de la simulación del corte ortogonal de los materiales compuestos de toda la bibliografía obtenida, que en particular se centra en materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio.

Para validar el modelo propuesto en este proyecto para materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio, son utilizados los resultados experimentales mostrados en este capítulo. Por otra parte, el modelo de materiales compuestos reforzados con fibras de carbono, no puede ser validado, ya que no existen experimentos con los que se puedan comparar resultados. Por ello, se propondrá dicha validación como trabajo futuro. Aún así, se podrá comparar este último modelo con el de fibra de vidrio, obteniendo conclusiones sobre el comportamiento que tiene un material dúctil (vidrio) y un material frágil (carbono).

2.1.- CORTE ORTOGONAL EXPERIMENTAL DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Como se ha comentado anteriormente, el mecanizado de los materiales compuestos es más difícil de comprender que el de los metales, debido al comportamiento tan variable que tienen este tipo de materiales. Asimismo, no se cuenta con una amplia bibliografía y eso hace aún más complicado comparar con el mecanizado de metales, y los datos experimentales con la teoría.

No existe una amplia investigación experimental de mecanizado de materiales de baja maquinabilidad como los compuestos FRP (fibre reinforced plastic) debido a su elevado coste, laboriosa preparación de ensayos y riesgos de salud que suponen la inhalación de las fibras y el contacto con la piel. La forma de los compuestos dificulta la realización de pruebas a bajas velocidades de corte, ya que en su mayoría son de paredes delgadas. Esto se consigue tras un complejo posicionamiento de máquinas-herramienta.



La investigación sobre la formación de viruta es casi insignificante, ya que no existen modelos disponibles que permitan correlacionar las observaciones experimentales con la teoría.

En los últimos años se han realizado una serie de experimentos en los que se ha intentado buscar una relación de dependencia entre los distintos parámetros de corte, las fuerzas de corte y avance, la geometría de la herramienta, la orientación de las fibras y la formación de la viruta. Numerosos autores han estudiado estos efectos además del daño que se produce en la matriz y la influencia que tiene este sobre la orientación de fibra. Algunos de ellos han aportado distintos modelos numéricos con los que han conseguido obtener buenos resultados y otros han optado por comparar los resultados obtenidos con compuestos reforzados por fibras de vidrio con los reforzados con fibras de carbono.

Como se ha comentado anteriormente las operaciones más comunes se realizan con corte oblicuo, pero en la mayoría de las simulaciones en el mecanizado de estudios numéricos este caso se simplifica al corte ortogonal. Este caso es el que encontramos en la mayor parte de la bibliografía y el que estudiamos en este proyecto.

Koplev [\[16\]](#) fue el primero en realizar experimentos en el corte ortogonal de compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de carbono (CFRP) en el año 1980. Este autor concluye que la orientación de las fibras es un factor muy importante en la formación de la viruta y esta se produce a través de rupturas sucesivas.

Takeyama y Lijma [\[17\]](#) estudiaron el proceso de formación de viruta de compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras unidireccionales de vidrio (UD-GFRP) y al igual que Koplev obtuvieron que la orientación de fibra con respecto a la dirección de corte estaba relacionada con la formación de viruta. Además, estudiaron el daño de la matriz durante el mecanizado y encontraron que también éste depende de la orientación de las fibras, y que para ángulos positivos el valor máximo de daño se da para orientaciones de fibra de 30 a 60° y para ángulos negativos, el daño es prácticamente insignificante.

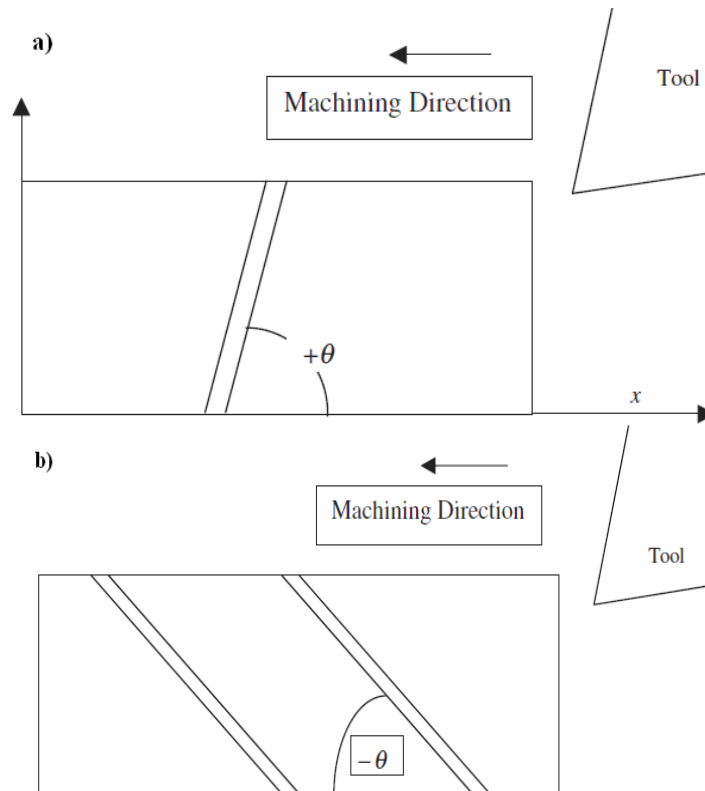


Figura 2.1.- Orientación de las fibras medidas en sentido horario desde el eje x de la fibra. a) Orientación positiva. b) Orientación negativa [18].

Inoue y Yuge [19] presentaron los daños resultantes internos efectuados durante el mecanizado ortogonal de laminados de GFRP para diferentes orientaciones de fibra. Para ello siguieron la técnica de líquidos penetrantes y observaron que el máximo daño se da para orientaciones de fibras positivas y para ángulo entre 30° y 45° . En estos casos se encontraron con una delaminación de la fibra-matriz y un desplazamiento de plano. Sin embargo, para orientaciones de fibras negativas, obtuvieron un daño insignificante. También observaron tres modos distintos de corte, lo que implican tres modos de daño diferentes. Dichos modos son el fallo de la interfase fibra-matriz para fibras de orientaciones positivas, el corte limpio de las fibras para la mayoría de las fibras con orientación negativa y la rotura a la tracción de fibras con orientación negativa para ángulos pequeños (de 0° a -15°).

Wang et al. [20] estudian analítica y experimentalmente los mecanismos de corte ortogonal de compuestos grafito/epoxi con una herramienta de diamante. Ellos desarrollan un modelo que predice la fuerza de corte en términos del ángulo de desprendimiento, ángulo de incidencia, profundidad de corte y velocidad de corte.

También estudian el daño de la matriz y al igual que los autores anteriores concluyen que los daños más severos se dan para fibras de orientaciones positivas, especialmente para ángulos entre 30° y 60° , pero al contrario que ellos, opinan que el daño para fibras de orientaciones negativas no es insignificante y que la orientación de la fibra y la profundidad de corte no tiene mucha influencia sobre este tipo de fibras.

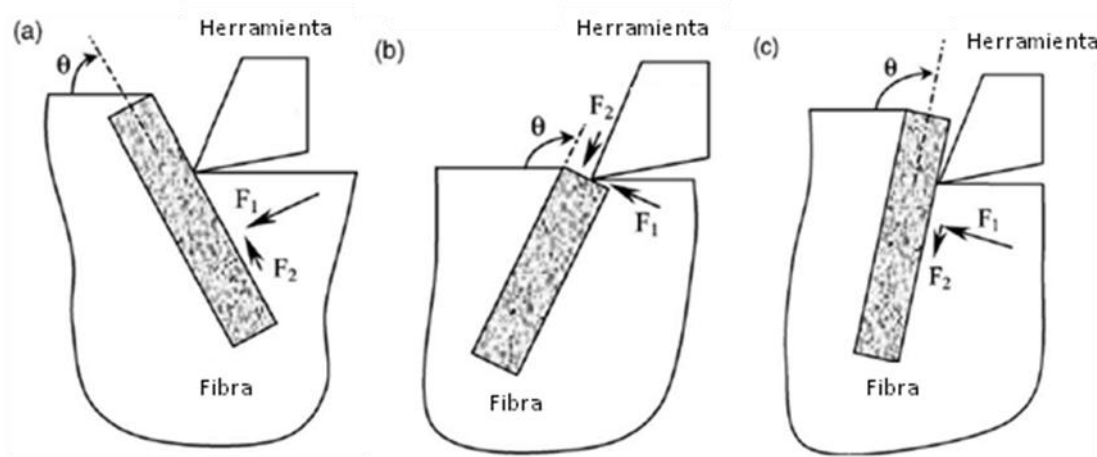


Figura 2.2.- Modelo de mecanizado con una sola fibra con distintas orientaciones.

Fuerzas [20].

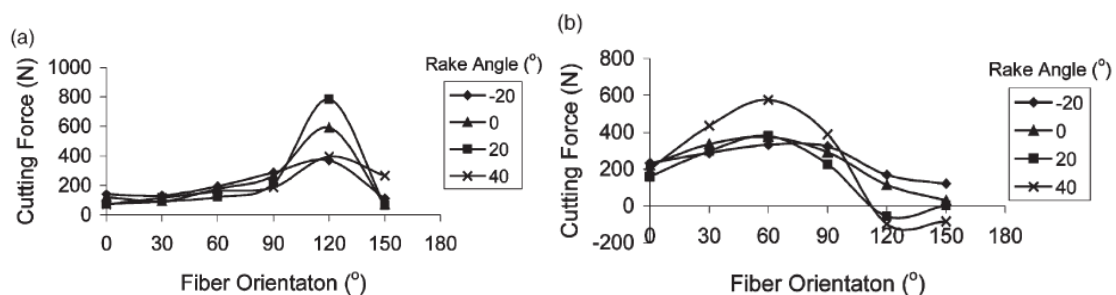


Figura 2.3.- Efecto de la orientación de fibra en la fuerza de corte (izquierda) y en la fuerza de avance (derecha) con una profundidad de corte de 0.05 mm [20].

Bhatnagar [21] encuentra un nuevo método para estimar el promedio de la fuerza de corte. Dicha fuerza aumenta gradualmente para ángulos de fibra negativos al aumentar el ángulo de la fibra, pero para ángulos positivos sufre un gran incremento al aumentar la orientación de la fibra. Otra importante observación que hace este autor es que las condiciones de fricción en la cara de desprendimiento cambian según la orientación de fibra.

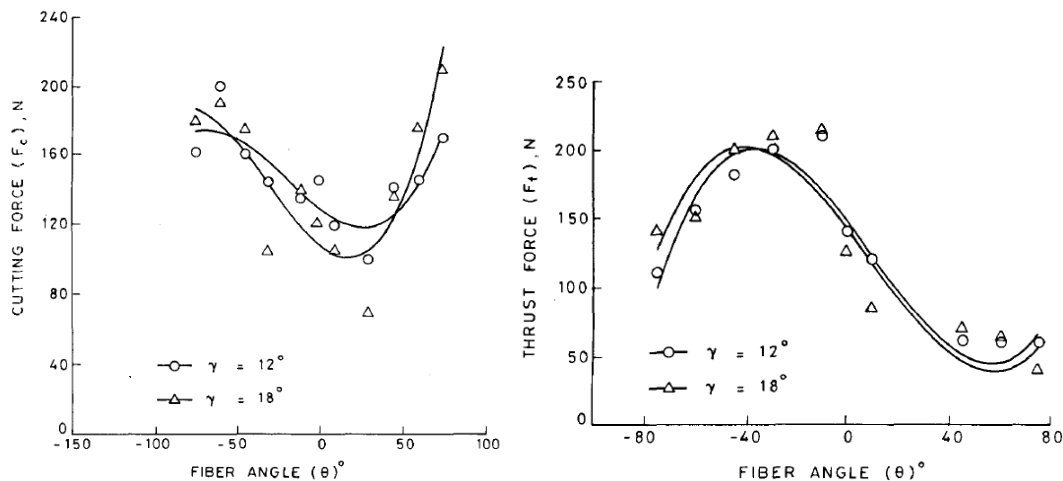


Figura 2.4.- Variación de la fuerza de corte y la fuerza de avance con la orientación de la fibra y el ángulo de desprendimiento de la herramienta [21].

Komanduri R. [22], muestra el vínculo que existe entre las condiciones de mecanizado y la fuerza de corte, así como de la calidad de la superficie. Si la velocidad de corte tiene la misma dirección de las fibras, el ángulo de desprendimiento tiene muy poca influencia sobre el desgaste de la superficie de desprendimiento, pero sí influye en la cara del flanco. Este autor propone una distribución de la fuerza en la zona cercana a la punta de la herramienta por poner las condiciones de fricción en la cara de alivio y no en la cara de corte, como en el caso del mecanizado de materiales metálicos.

Wern Cw et al. [23] realizan un estudio de las tensiones locales con la técnica de fotoelasticidad durante el mecanizado de un material termoplástico reforzado con fibras de carbono. Ellos calculan las fuerzas de corte en función de diferentes parámetros fotoelásticos y la orientación de las fibras.

En el trabajo de Pwu HY. y Hocheng H. [24] se realiza una correlación, basada en la teoría clásica de vigas y la teoría de laminados, entre la fuerza de corte, la longitud y el espesor de viruta si la velocidad de corte es perpendicular a la orientación de las fibras.

Wang et al. [25] y Arola et al. [26] estudiaron la influencia de la geometría de la herramienta, el proceso de deterioro y las orientaciones de la fibra en las fuerzas de corte y la rugosidad de la superficie. Descubrieron que el proceso de formación de

viruta tiene lugar debido a la rotura frágil dentro de la estructura del material compuesto y que esta es discontinua e independiente de la orientación de las fibras.

Además, construyeron un modelo numérico que permite obtener las fuerzas de corte durante el mecanizado en corte ortogonal de los materiales compuestos. Se trata de un modelo bidimensional que utiliza como criterio de fallo el criterio de máxima tensión y el de Tsai-Hill. Existe un error relativo entre las mediciones y los valores numéricos proporcionados por este modelo que oscilan entre el 50% para ángulos de 15° y 30% para ángulos de 30° .

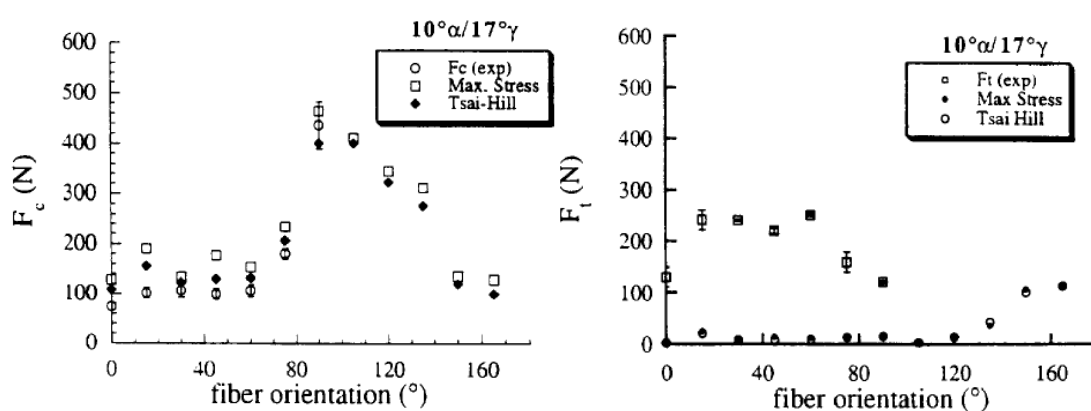


Figura 2.5.- Fuerza de corte (izquierda) y fuerza de avance (derecha). Comparación de resultados experimentales con los modelos construidos con criterio de máxima tensión y de Tsai-Hill [25].

Mkaddem, A; El Mansori, M. y Nayak D; Bhatnagar, N; Mahajan, P. [18, 20, 27] realizaron importantes trabajos experimentales sobre el corte ortogonal de GFRP, donde estudiaron el efecto de la orientación de las fibras (siempre considerando estas con una orientación negativa), profundidad de corte, ángulo de inclinación y el radio del filo de corte. Sus resultados experimentales obtenidos han sido ampliamente utilizados para validar los modelos numéricos en la literatura científica y por ello, han sido de gran utilidad como referencia para el presente proyecto.

Algunas de las conclusiones más significativas a las que llegaron estos autores y que nos interesan para este proyecto son las siguientes:

- La longitud de la viruta y por tanto, la rotura de las fibras, disminuye al aumentar la orientación de las fibras y el aumento que se produce al aumentar el ángulo de inclinación es casi despreciable.
- La viruta en polvo se observa para todas las orientaciones de fibra, pero para -75° y -90° , y bajos ángulos de inclinación, como 10° , es más predominante que para ángulos de inclinación de 20° o más.
- Casi todas las fibras fallan a lo largo de su eje transversal. El principal motivo es la rotura a tracción.
- La fuerza de avance es mayor que la fuerza de corte para profundidades de corte de 0.1 mm, muy parecida para 0.2 mm y menor para 0.3 mm de profundidad, hasta una orientación de fibras de -45° . Para valores superiores de orientación, la fuerza de corte es mayor que la de avance independientemente de la inclinación de las herramientas y la profundidad de corte. El menor valor de fuerza de corte se da para un ángulo de inclinación de -30° sin importar la profundidad de corte, mientras que la fuerza de avance varía según estos dos parámetros.

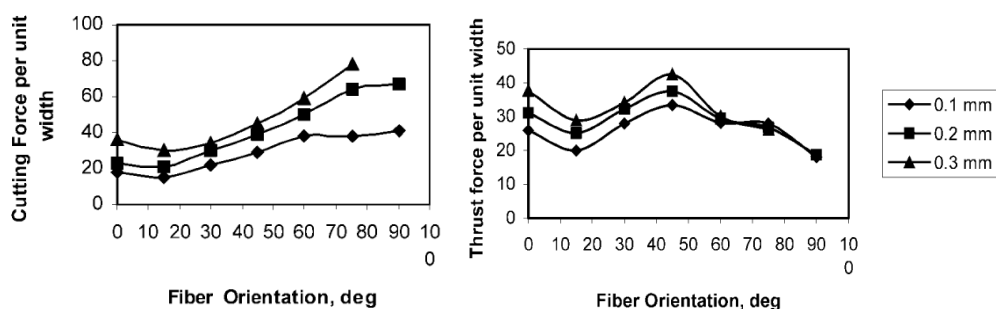


Figura 2.6.- Variación de las fuerzas de corte (izquierda) y avance (derecha) con la orientación de fibra para diferentes profundidades de corte y ángulo de desprendimiento de 10° [27].

- La orientación de la fibra es un factor clave en el daño de la matriz. El máximo daño se produce para orientaciones de -90° y el mínimo entre -15° y -30° . El ángulo de inclinación no influye en el daño de la matriz para orientaciones de fibra menores de -45° , sin embargo, para orientaciones

superiores a -60° el daño se reduce al aumentar el ángulo de inclinación de la herramienta. Sin tener en cuenta este último parámetro, se puede decir que el daño de la matriz aumenta ligeramente hasta -60° para incrementar su valor rápidamente hasta -90° .

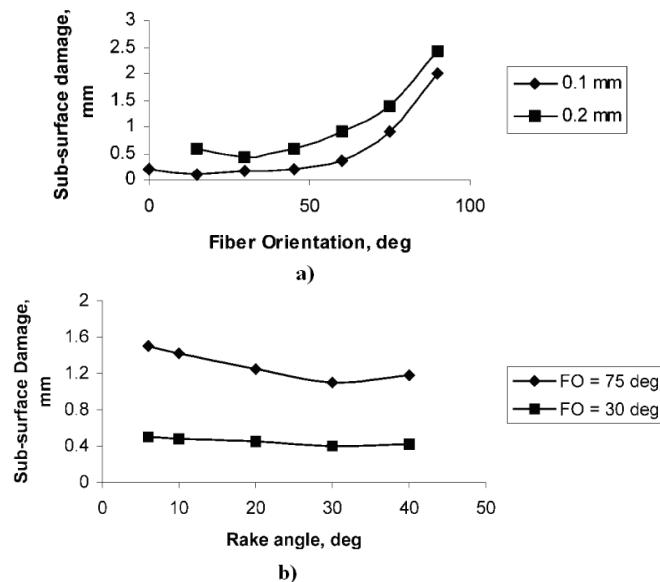


Figura 2.7.- a) Variación del daño de la matriz con la orientación de fibra para diferentes profundidades de corte. b) Variación del daño de la matriz con el ángulo de desprendimiento para diferentes orientaciones [27].

- Cuando las orientaciones de fibra son menores que -90° , aparecen tres zonas de deformación: agrietamiento, rotura y delaminación. Si es mayor que -90° el pandeo de la fibra durante el mecanismo de corte es más significativo con lo que puede llegar a complicar bastante el proceso de corte.

En los últimos años, documentos de Lasri L et al. [28] y Venu Gopala Rao G et al. [29] muestran algunos experimentos en los que se ha obtenido una relación de dependencia entre la viruta y microestructura en lo que respecta a los daños locales causados por el filo de la herramienta de corte. En este nivel de estudio, hay que tener en cuenta la heterogeneidad de los materiales compuestos y su anisotropía, ya que esta hace que su respuesta sea más sensible a la carga mecánica y al daño. Los conocimientos sobre los fenómenos físicos que se tienen hasta el momento están limitados principalmente a los estudios experimentales.

2.2.- SIMULACIÓN DEL CORTE ORTOGONAL DE MATERIALES COMPUESTOS

El mecanizado de materiales compuestos implica un gran número de parámetros físicos y una simulación numérica que puede proporcionar información valiosa para comprender los fenómenos de corte. En los últimos años, han sido desarrollados pocos estudios numéricos. Elementos finitos (FE) es un método muy eficaz que permite completar los estudios experimentales. Algunas de sus ventajas son que se evitan muchos problemas técnicos y de coste elevado y la posibilidad de desacoplar los parámetros que influyen en los problemas en función de un gran número de variables tales como los procesos de mecanizado. Las simulaciones FE pueden adecuar, numéricamente, muchos fenómenos dentro del mismo modelo, y también pueden dar información sobre los mecanismos de eliminación de material. Se pueden distinguir dos tipos de modelos:

- Modelos macro-mecánicos: en los que generalmente es el material compuesto modelado como un material ortotrópico homogéneo equivalente.
- Modelos micro-mecánicos: en los que las fibras se distinguen de la matriz y necesitan modelos complejos de la interfaz de fibra-matriz.

En general, los modelos micro-mecánicos ofrecen mejores estimaciones de las fuerzas de corte y una mejor precisión de los resultados que los modelos macro-mecánicos, pero su desarrollo es difícil y se convierte a veces en un análisis complejo debido al gran número de variables e hipótesis a considerar. La solución ideal parece ser desarrollar un modelo combinado. Esto ofrecería en un mismo tiempo una mayor precisión de las respuestas globales y la capacidad para analizar los mecanismos micromecánicos así como la formación de viruta y el daño local.

Los mecanismos macromecánicos predicen la formación de viruta y el daño en la matriz de la pieza de trabajo para diferentes condiciones de corte. Sin embargo, estos modelos imponen el camino de la fractura en la estructura del compuesto antes de



iniciar el proceso de mecanizado. En consecuencia, el proceso de formación de viruta y el daño de la matriz no puede ser predicho con exactitud.

En general, los mecanismos de daño en laminados compuestos incluyen cuatro tipos de fallo: agrietamiento de la matriz, eliminación de la interfaz de fibra-matriz, la rotura de fibras y la delaminación entre las capas. Por lo general, el agrietamiento de la matriz es el primer proceso de deterioro que tiene lugar ya que la matriz tiene la tensión de rotura más baja de todos los componentes de los materiales compuestos. Acompañando a este tipo de fallo puede ir la eliminación de la interfaz de fibra-matriz, facilitando su progresión. La grieta transversal se puede producir sin romper las fibras longitudinales. Estos fallos, que ocurren paralelamente a las fibras pueden tener lugar durante el mecanizado y conducen a la degradación de la rigidez. Mediante el uso del criterio de Hashin o criterios de esfuerzo máximo se puede considerar a cada modo de fallo por separado. Por lo tanto, su combinación con la reducción de la rigidez permite analizar la progresión del daño en la matriz del compuesto bajo la carga estática y dinámica.

Arola y Ramulu [26] fueron los primeros en presentar un estudio de corte ortogonal de compuestos basado en elementos finitos. Ramesh et al. [30] estudiaron la influencia que tenía la orientación de cuatro FRP diferentes. Para ello, llevaron a cabo mecanismos de fallo basados en la rotura de la fibra-matriz, obteniendo así que la carga necesaria para provocar el fallo depende de la orientación de las fibras. Otros autores como Mahdi y Zhang [31, 32] realizaron simulaciones del corte de compuestos tanto en 2D como en 3D. Mientras que en los análisis de 2D se representa un material homogéneo equivalente prediciendo las fuerzas de corte de FRP como una relación con la orientación de las fibras, en 3D se simula un elemento compuesto constituido por diferentes componentes (fibra y matriz) perfectamente vinculados. En otro artículo Arola et al. [33] exponen la influencia que tiene la geometría de la herramienta en la reducción de las fuerzas y los daños de la matriz para el mecanizado ortogonal de FRP unidireccionales. Ellos obtienen una buena aproximación entre las fuerzas de corte estudiadas y las experimentales. Con las fuerzas de avance no ocurre lo mismo, ya que se encuentran con valores distintos a los estudiados. Este hecho se reproduce al realizar estudios con metales y se debe a que resulta muy complicado reproducir la interacción entre la herramienta y la pieza que se mecaniza [34].



3.- MODELO NUMÉRICO

En este capítulo se define el modelo numérico utilizado para las simulaciones de este proyecto. Como se ha comentado anteriormente, el modelo elegido es un modelo lagrangiano, en el cual la malla se mueve solidariamente con el material.

Los materiales utilizados son resinas epoxi reforzadas con fibras vidrio (GFRP) y carbono (CFRP). El motivo de utilizar como matriz la resina epoxi es claro, ya que es la más utilizada dentro de todos los tipos de resina y presenta mejores propiedades que la resina poliéster, que sería la segunda más utilizada.

Las fibras de vidrio son las más utilizadas como refuerzo en aplicaciones industriales y las de menor coste, de ahí que se estudie su comportamiento al ser mecanizadas. Sin embargo, la elección de estudiar el comportamiento de las fibras de carbono quizás no sea tan evidente.

Esta elección queda justificada como se ha explicado en el estudio teórico, debido a las buenas propiedades mecánicas que tienen las fibras de carbono frente a las fibras de vidrio, y el incremento que están teniendo en algunas aplicaciones. Además, es de gran interés comparar el comportamiento y el daño que sufren al ser mecanizados dos tipos de materiales distintos: uno dúctil (vidrio) y otro frágil (carbono).

Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados y de la herramienta se muestran tabuladas a continuación:

Tabla 3.1.- Propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

PROPIEDADES MECÁNICAS	GFRP	CFRP
Módulo de elasticidad longitudinal, E_1 (GPa)	48	126
Módulo de elasticidad transversal, E_2 (GPa)	12	11
Módulo a cortadura, G_{12} (GPa)	6	3.6
Coefficiente de Poisson, ν_{12}	0.19	0.28
Resistencia longitudinal a tracción, X^T (MPa)	550	1950
Resistencia longitudinal a compresión, X^C (MPa)	400	1480
Resistencia transversal a tracción, Y^T (MPa)	30	48
Resistencia transversal a compresión, Y^C (MPa)	64	200
Resistencia a cortadura, S (MPa)	12.5	79

Tabla 3.2.- Propiedades mecánicas de la herramienta.

PROPIEDADES MECÁNICAS	HERRAMIENTA
Densidad	14000 kg/m ³
Módulo de Young	1000 GPa
Coefficiente de Poisson	0.3

Al igual que en la mayoría de los artículos de la bibliografía, se realiza el estudio para orientaciones de fibra negativas. Esto es debido a que en el mecanizado de fibras con orientaciones positivas se obtienen malos acabados, superficies mucho más ásperas, ya que la fibra se opone al movimiento de la herramienta, y se produce la delaminación de la fibra-matriz, sobresaliendo la fibra del plano de corte provocando rugosidades.

En la siguiente figura, se definen la geometría y condiciones de contorno del modelo numérico, indicándose las direcciones de las fuerzas, velocidad de corte y orientación de fibra como se muestra:

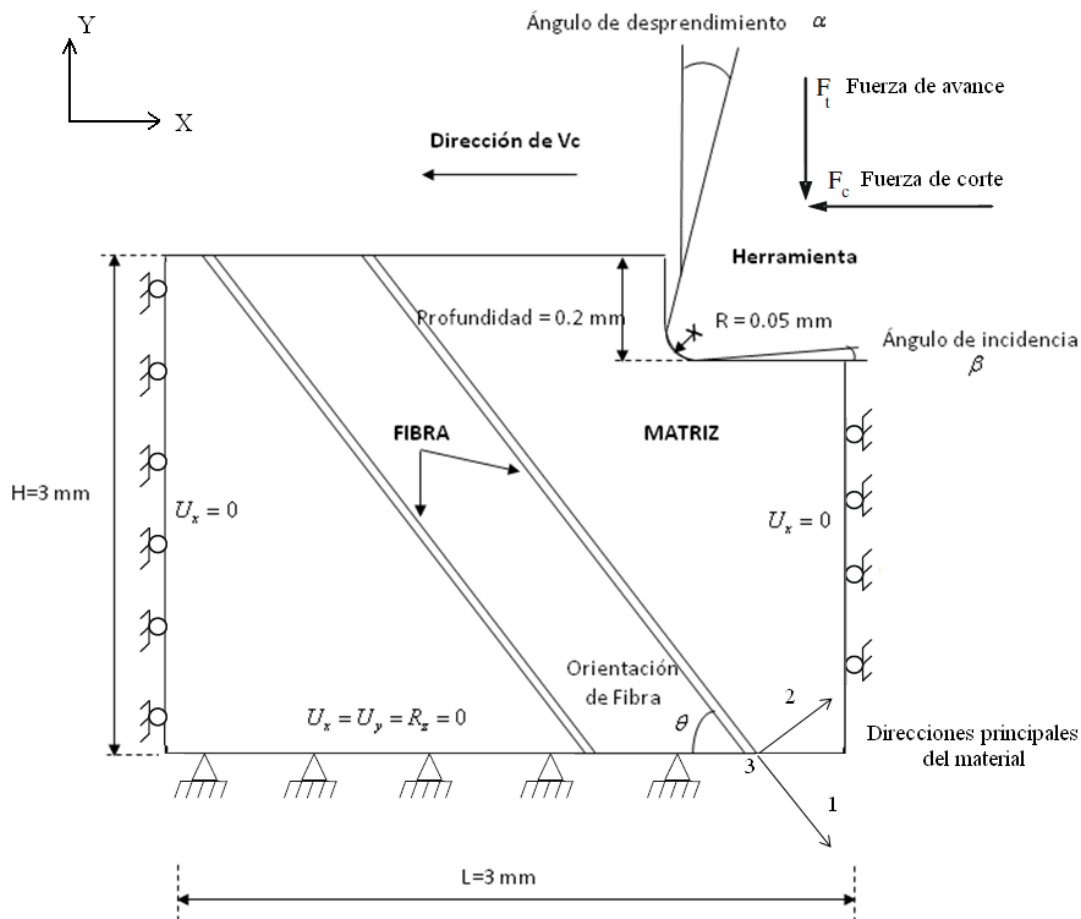


Figura 3.1.- Modelo numérico [35].

La definición del mallado de un problema complejo como el corte ortogonal es una de las tareas más complicadas de la modelización numérica. Su principal dificultad está en encontrar un equilibrio entre el tamaño de los elementos más pequeños del mallado y el tiempo de cálculo que implica utilizar ese tamaño de malla, ya que en los modelos con integración explícita, el incremento de tiempo de integración es inversamente proporcional al tamaño característico del elemento más pequeño de la malla. Es decir, si disminuye el tamaño de la malla aumenta el tiempo de cálculo.

En proyectos anteriores, se realizaron simulaciones con distintos tamaños de malla, los cuales fueron: 12 μm , 9 μm , 7 μm , 5 μm y 3 μm . Los mejores resultados se obtuvieron para los tres últimos tamaños y estos no son muy diferentes entre sí.

Como se ha comentado antes, se intenta encontrar un equilibrio entre el tamaño de los elementos más pequeños del mallado y el tiempo de cálculo. Al ofrecer estos tres casos los mismos resultados, se considera que el tamaño de la malla más adecuado es 7

μm , ya que es el que supone menos tiempo de cálculo. Y por ello, es el tamaño elegido para el modelo de este proyecto.

Este tamaño de la malla nos permite realizar, con un ordenador básico de cálculo como el utilizado para este trabajo, tres simulaciones a la vez, lo que supone un tiempo de cálculo de 48 horas aproximadamente.

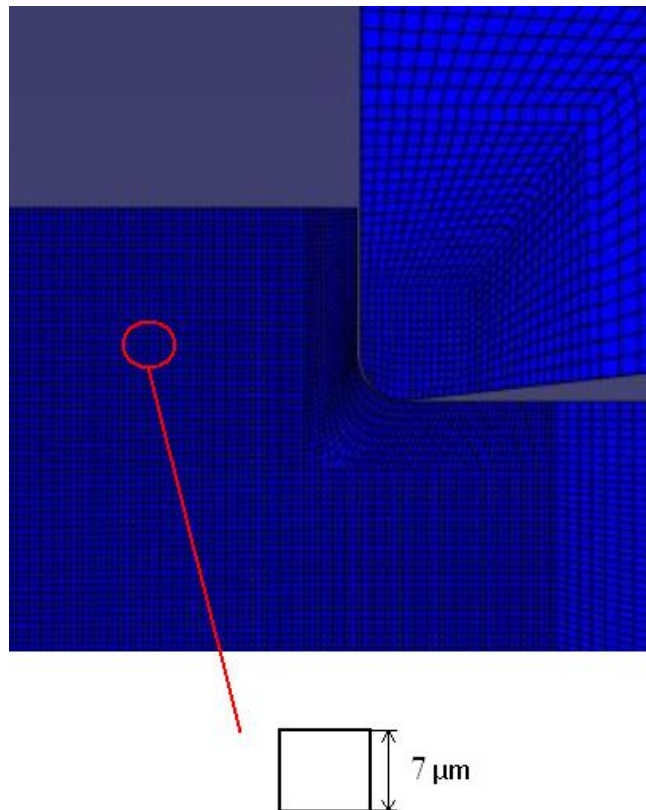


Figura 3.2.- Tamaño de la malla.

A la hora de realizar las simulaciones, una serie de parámetros permanecerán fijos y otros serán variables. Los *parámetros fijos* son:

- *Profundidad de corte*: es de 0.2 mm y se ha tomado ese valor teniendo en cuenta que es la mínima suficiente para encontrar condiciones estables durante el proceso de corte ortogonal. Si se compara con el valor utilizado en el caso de estudiar las condiciones estacionarias en los metales, este valor es muy pequeño, ya que en el estudio de corte de los materiales compuestos no se tiene en cuenta



el calor generado ni las temperaturas en el material y cuando se trabaja con metales sí.

- Velocidad de corte: su valor es -0.01 m/s en dirección X. Es negativa porque el sentido es negativo con respecto al sistema de ejes coordenados.
- Radio de punta: el radio de punta de la herramienta es de 0.05mm
- Módulos de elasticidad y resistencia del material: sus valores se indican en las tablas anteriores.
- Coefficiente de fricción: permanece fijo con un valor de 0.5.

Los *parámetros variables* son:

- Ángulo de desprendimiento (para el caso del vidrio): se realizan dos estudios, para un ángulo de 5° y 0°. El estudio con ángulo de desprendimiento de 5° nos servirá para validar el modelo propuesto y el de 0° para verificarlo.
- Energía de deformación: es la energía que soporta el material hasta rotura. Y se calcula como el área debajo de la curva tensión-deformación.

El comportamiento teórico que tiene un material, es el que se muestra en la siguiente gráfica tensión-deformación. El material se deforma elásticamente y una vez que se alcanza el límite elástico, el material rompe.

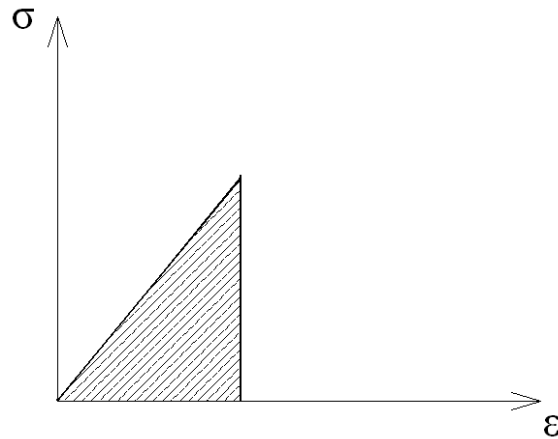


Figura 3.3.- Gráfica σ - ϵ . Comportamiento teórico.

En realidad, los materiales se comportan como se muestra en la gráfica representada a continuación. El material no rompe al alcanzar el límite elástico, sino que se sigue deformando una vez alcanzado este.

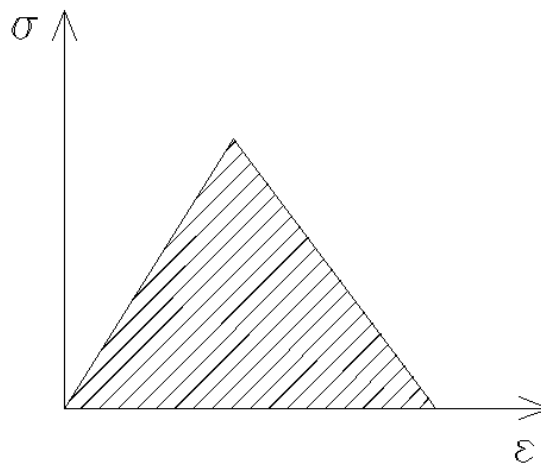


Figura 3.4.- Gráfica σ - ϵ . Comportamiento real.

En este trabajo se consideran dos casos de energía: energía de deformación constante en las cuatro direcciones o no constante. Tener la misma energía en las cuatro direcciones significa tener la misma energía para la dirección longitudinal (X) a tracción y a compresión, y para la dirección transversal (Y), también a tracción y a compresión.

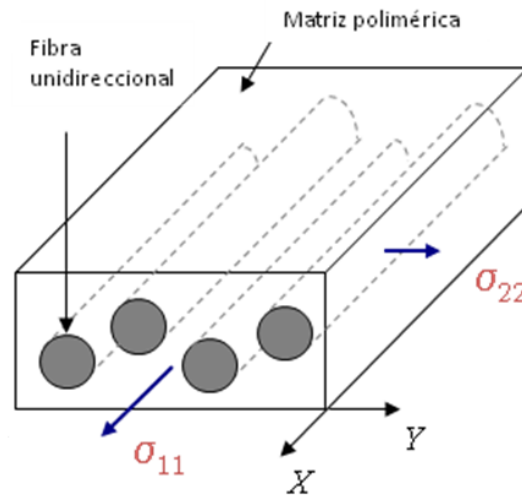


Figura 3.5.- Principales tensiones y direcciones en el conjunto fibra-matriz [35].

Para el caso de energía constante se ha elegido 220 J/m^2 , debido a que en trabajos anteriores se han estudiado distintos valores de energía obteniéndose buenos resultados con este valor.

En el caso de energía no constante, la energía tomará valores distintos según su dirección y si es a tracción o compresión.

El cálculo teórico de la energía de deformación (figura 3.3) se realizaría con la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{2} \cdot E \cdot \varepsilon \cdot L_c$$

donde E es el módulo de elasticidad del material, ε la deformación del material y L_c la longitud característica del elemento más pequeño de la malla.

Pero dado que los materiales en realidad no se comportan así y que una curva como la de la figura 3.4, sólo se puede obtener a través de ensayos, con los que no se cuentan hasta ahora, el cálculo de la energía de deformación se complica.

Como el cálculo de la energía de deformación no es el objetivo de este proyecto y se ha visto que necesita un estudio más exhaustivo, en este proyecto

se harán algunas suposiciones para calcularla y se propondrá como trabajo futuro realizar un estudio de la energía más aproximado que el que se ha hecho, para poder mejorar así, los resultados obtenidos.

Como se observa en la figura 3.4, se puede hacer un primer cálculo de la energía de deformación con la ecuación: $U = \frac{1}{2} \cdot E \cdot \varepsilon \cdot L_c$. Con ello, se calcula el área debajo de la curva hasta el límite elástico.

Para calcular el resto del área, los resultados obtenidos deben ser multiplicados por un parámetro, que basándonos en los estudios que se han realizado hasta ahora, se ha elegido multiplicar estos valores por 2 para los CFRP y por 4 para los GFRP. Además, gracias a estos estudios y a las propiedades de los materiales, se sabe que la energía en dirección Y, debe ser mayor que la energía en dirección X, aproximadamente un 50%. Y a compresión, debe ser mayor que a tracción, también aproximadamente un 50%.

Esto puede ser explicado, con la figura 3.6, donde se muestra que el comportamiento de la matriz de los materiales compuestos es más dúctil que el de la fibra y por tanto, con tensiones menores se deformará más, y que el comportamiento de la fibra de carbono es más frágil que el de la fibra de vidrio y por ello se multiplica la energía de deformación en el caso de la fibra de carbono por un parámetro menor.

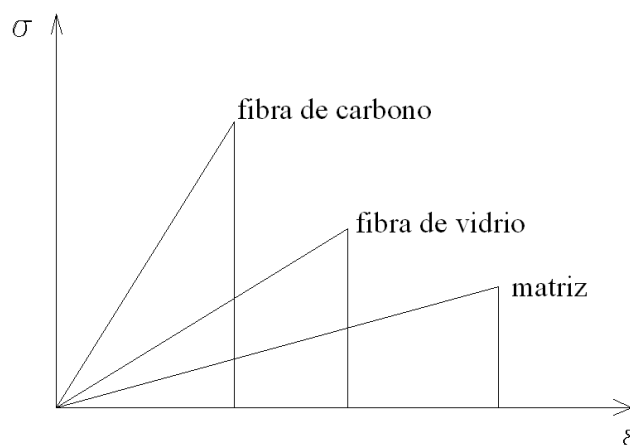


Figura 3.6.- Gráfica σ - ε . Comportamiento de la fibra y la matriz.

Los resultados obtenidos teniendo en cuenta estas suposiciones son, para los CFRP:

$$U_{XT} = 194 \text{ J/m}^2$$

$$U_{XC} = 112 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YT} = 291 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YC} = 437 \text{ J/m}^2$$

Y para los GFRP:

$$U_{XT} = 82 \text{ J/m}^2$$

$$U_{XC} = 44 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YT} = 123 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YC} = 185 \text{ J/m}^2$$

- Orientación de fibra: se realizan simulaciones para distintas orientaciones de fibra. Estas son: 0° , -15° , -30° , -45° , -60° , -75° , -90° .

La modificación de estos parámetros nos permite ver la influencia de estos sobre las fuerzas de corte y avance, y sobre el daño de la matriz.

Los parámetros de corte (profundidad de corte, velocidad de corte, ángulo de desprendimiento y radio de punta) y la geometría de la herramienta se han determinado según los valores de la bibliografía, concretamente de los experimentos de Bhatnagar [18], con el objetivo de poder validar el modelo propuesto en este proyecto.

Para analizar el daño se ha utilizado el criterio de Hashin. Este propone cuatro modos de fallo del material: fallo por tensión en la fibra, fallo por compresión en la fibra, fallo por tracción en la matriz y fallo por compresión en la matriz.

$$\text{Tracción en la fibra } (\sigma_{11} > 0) \quad d_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^t} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \leq 1$$

$$\text{Compresión en la fibra } (\sigma_{11} < 0) \quad d_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^c} \right)^2 \leq 1$$

$$\text{Tracción en la matriz } (\sigma_{22} > 0) \quad d_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \leq 1$$

$$\text{Compresión en la matriz } (\sigma_{22} < 0) \quad d_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^t} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^t} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y^c} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \leq 1$$

Donde σ_{11} indica la tensión en la dirección de la fibra, σ_{22} la tensión en la dirección transversal a la fibra, y τ_{12} la tensión en el plano de esfuerzo cortante. X^t , X^c , Y^t , Y^c , S^t , y S^L son las resistencias longitudinales, transversales y a cortadura a tracción y compresión del material.

En este proyecto sólo se realiza el análisis del daño de la matriz, por lo que tendremos para cada orientación de fibra dos resultados: daño de la matriz a tracción y daño de la matriz a compresión. El motivo de realizar solo un análisis del daño de la matriz, es que el daño de la fibra es tan pequeño que puede considerarse despreciable frente al daño de la matriz. Esto se debe a la baja resistencia a tracción y compresión de la matriz comparada con la de las fibras.

La siguiente figura muestra el daño de la matriz (izquierda) y el daño de la fibra (derecha) para uno de los casos estudiados. Se puede ver claramente que el daño de la fibra casi no se aprecia comparado con el de la matriz.

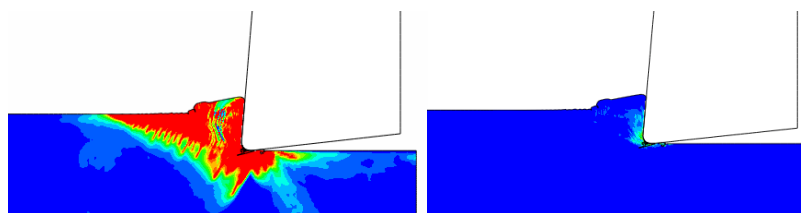


Figura 3.7.- Comparación del daño de la matriz (izquierda) y el daño de la fibra (derecha).



En la bibliografía consultada, se puede ver que algunos autores utilizan otros criterios de fallo como el de Tsai – Hill. Este criterio indica el daño tanto a tracción como a compresión en un análisis de 2D.

$$\textbf{Tsai- Hill} \quad \left(\frac{\sigma_{11}}{X} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S} \right)^2 \geq 1$$

Ambos criterios son buenos. El motivo de utilizar para este proyecto el criterio de Hashin es únicamente que es el criterio que viene implementado en ABAQUS. De esta forma no es necesario programar un criterio nuevo, lo que se propone como trabajo futuro, y podemos ver los cuatro fallos por separado.



4.- VALIDACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para dos materiales cuya matriz es resina epoxi y están reforzados con fibras de vidrio o con fibras de carbono, GFRP y CFRP respectivamente. En el caso de GFRP se ha procedido a su validación comparando con los resultados experimentales de la bibliografía y en el de CFRP se han estudiado los resultados numéricos con el objetivo de comprender mejor su comportamiento al ser mecanizado, comparar un material dúctil y otro frágil, y poder simplificar así posteriores estudios y ensayos.

Los resultados obtenidos en las simulaciones han sido comparados con los resultados experimentales de Bhatnagar [\[18\]](#).

El daño de la matriz será analizado tanto a compresión como a tracción sin hacer ninguna comparación con resultados experimentales, ya que no contamos con datos que analicen el daño en las mismas condiciones que nuestro proyecto siguiendo el criterio de Hashin.

Para ambos materiales se han obtenido las fuerzas de corte y avance, así como el daño de la matriz. Se han realizado distintas simulaciones según se han ido modificando ciertos parámetros, como la orientación de las fibras y la energía de deformación para después intentar obtener una relación de estos con las magnitudes medidas. Además, en el caso de GFRP se han realizado simulaciones cambiando el ángulo de desprendimiento para verificar y comprobar que dicho modelo también es válido para otro ángulo y ver qué influencia puede tener este en los resultados.

Como se ha explicado en el capítulo anterior, el valor de la energía de deformación constante en las cuatro direcciones, es decir, direcciones X e Y a tracción y compresión, es de 220 J/m^2 , tanto para el caso de CFRP como el de GFRP. Se ha escogido este valor, porque en proyectos anteriores han sido estudiadas distintas energías de deformación y esta ofrece buenos resultados.

Para el caso de la energía no constante y GFRP, tenemos los siguientes valores según la dirección y si es a tracción o a compresión, cuyo cálculo ha sido explicado en el capítulo anterior:

$$U_{XT} = 82 \text{ J/m}^2$$

$$U_{XC} = 44 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YT} = 123 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YC} = 185 \text{ J/m}^2$$

Para el caso de CFRP, tenemos:

$$U_{XT} = 194 \text{ J/m}^2$$

$$U_{XC} = 112 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YT} = 291 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YC} = 437 \text{ J/m}^2$$

Los resultados de las fuerzas de las simulaciones que realizamos en ABAQUS vienen dados en gráficas como la que se muestra a continuación:

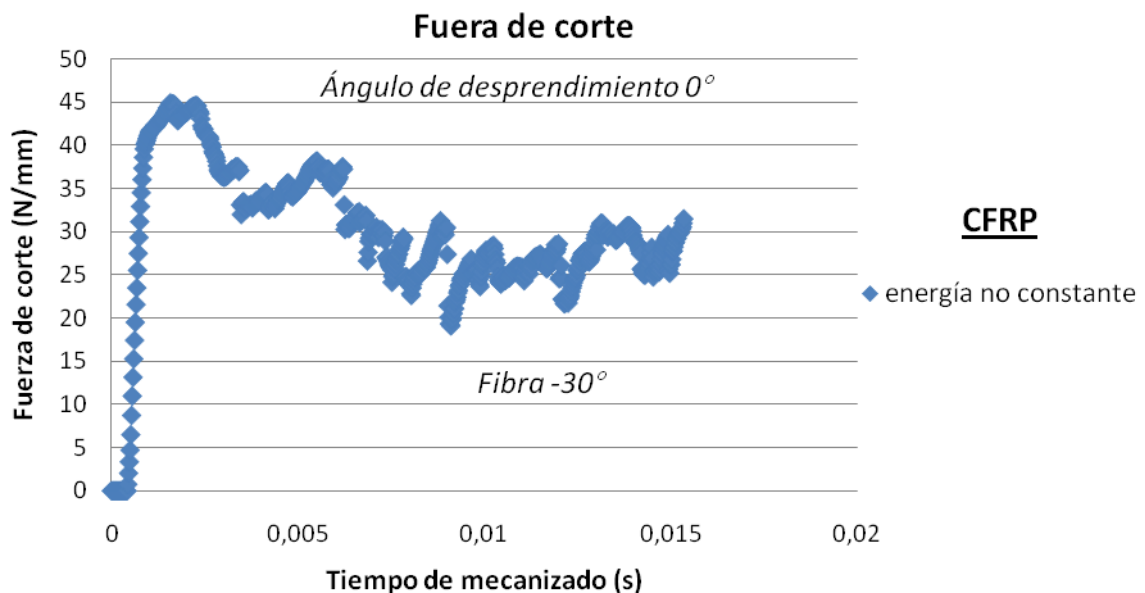


Figura 4.1.- Fuerza de corte en función del tiempo de mecanizado para el caso de CFRP con energía no constante y orientación de fibra -30° .

En la siguiente figura, se muestran tres curvas. La primera curva se representa a partir de los puntos más altos, la segunda, a partir de los puntos más altos pero en la zona de frecuencia, es decir, en la zona que la forma de la curva se repite en determinados periodos. Y la tercera, que se representa a partir de los puntos medios. La que mejor se adapta en forma y en valores a los resultados de la bibliografía, es la que representa los puntos máximos en la zona de frecuencia, y por tanto, es la que se escoge para representar los resultados de este proyecto.

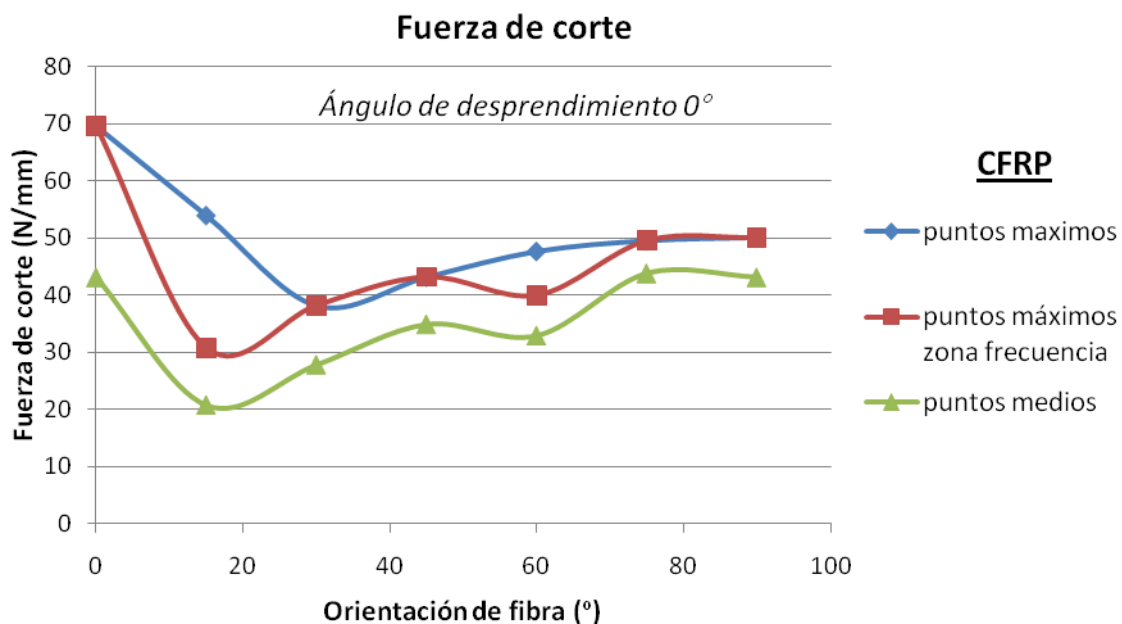


Figura 4.2.- Fuerza de corte en función de la orientación de fibra para el caso de CFRP y energía no constante.

En las gráficas en las que se representan las fuerzas en función de la orientación de la fibra, como la anterior, en realidad lo que se está representando son las fuerzas entre unidad de longitud, de ahí que sus unidades sean N/mm. Aunque en ABAQUS tenemos un modelo en 2D, representa la fuerza entre la profundidad (1 m), coincidiendo así con las unidades de las representaciones de la bibliografía [18].

Para presentar el daño de la matriz se han tomado imágenes en ABAQUS. En todos los casos, al trabajar con el criterio de Hashin, obtenemos dos imágenes del daño, daño a compresión y a tracción. Estas imágenes han sido tomadas en el mismo tiempo de mecanizado, $1.08 \cdot 10^{-2}$ s, para poder comparar unos casos con otros. Y este tiempo ha sido elegido de forma que pudiéramos ver el daño de la matriz desarrollado en todos los

casos. En la siguiente figura se puede ver, la evolución del daño de la matriz a lo largo del mecanizado para el caso de fibra de vidrio, con energía no constante, ángulo de desprendimiento 5° y orientación de fibra -15° .

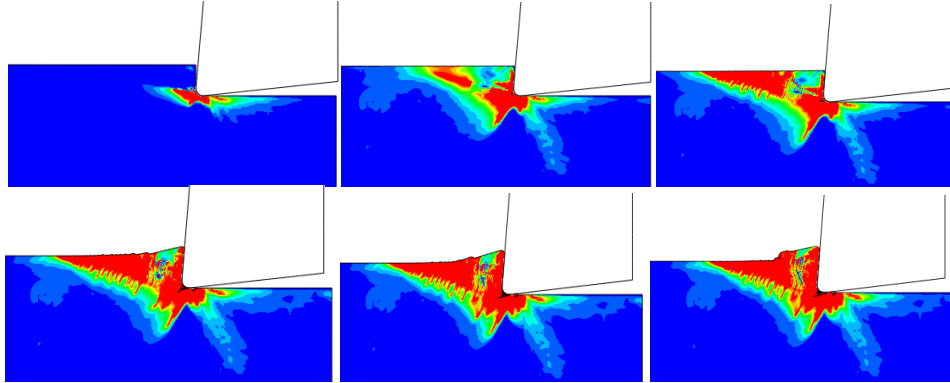


Figura 4.3.- Evolución del daño de la matriz a compresión para el caso de GFRP con energía no constante, ángulo de desprendimiento 5° y orientación -15° .

Se tiene que tener en cuenta en todos los resultados que se presentan en este capítulo que los casos de orientaciones de fibra 0° son algo especiales. No se dará tanta importancia a estos resultados, ya que es muy poco frecuente que se realice un mecanizado de materiales compuestos con esta orientación, debido a la poca probabilidad que existe de que la fibra se distribuya sin orientación en la matriz. Este hecho explica que en la bibliografía no se muestren datos de ensayos para orientación 0° .

4.1.- MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS DE VIDRIO (GFRP)

Se realizan distintos estudios en función de los parámetros variables, por lo que para analizar los resultados se van a hacer distintas clasificaciones. La primera clasificación se hace según el ángulo de desprendimiento que varía de 5° a 0°. El primer caso nos sirve para analizar y validar el modelo y el segundo para verificarlo y comprobarlo. Dichos casos se dividen a su vez según la energía de deformación, si esta es constante en todas las direcciones o no lo es. Y dentro de cada subcaso realizamos distintas simulaciones en función de las distintas orientaciones de fibra. Por último, se comenta el efecto que tiene el ángulo de desprendimiento sobre las fuerzas para los casos de energía constante y no constante.

- **ÁNGULO DE DESPRENDIMIENTO 5°.-**

- **Energía constante:**

El valor de la energía de deformación constante es:

$$U_{XT} = U_{XC} = U_{YT} = U_{YC} = 220 \text{ J/m}^2$$

A continuación, se expondrán los resultados para el caso de ángulo de desprendimiento 5° y energía constante en todas las direcciones.

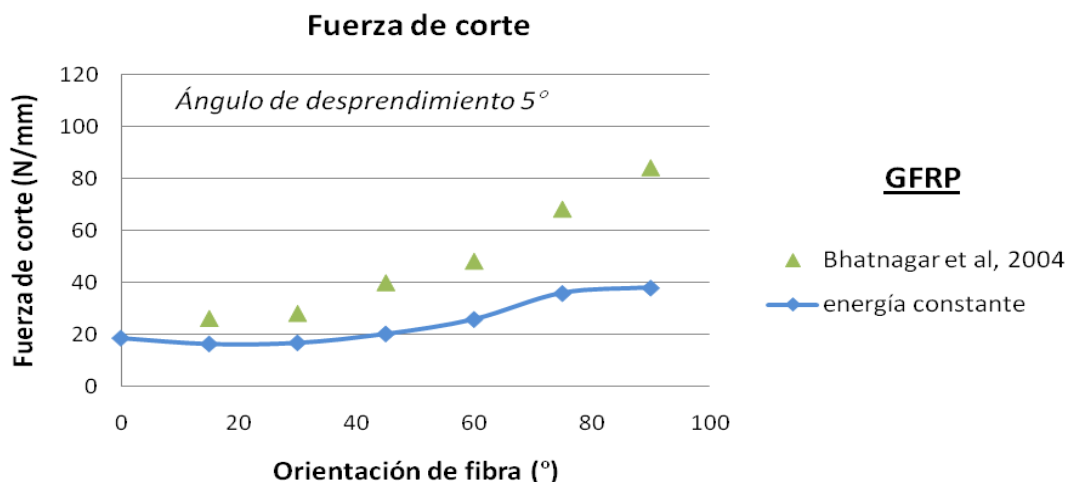


Figura 4.4.- Fuerza de corte para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía constante. Comparación de resultados con bibliografía.

Como se puede observar en la gráfica de la fuerza de corte para los GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía constante, la tendencia es la misma que en los resultados experimentales de la bibliografía. Los valores obtenidos en las simulaciones son menores que los de la bibliografía, obteniéndose en ambas curvas, la mínima fuerza de corte para orientaciones de -15° (16 N/mm y 26 N/mm) y la máxima para -90° (38 N/mm y 84 N/mm). Además, siguen una tendencia ascendente en la que las fuerzas aumentan progresivamente hasta -60° y fuertemente a partir de este caso hasta el de -90° .

El hecho de que la tendencia de la curva sea ascendente se debe a que según aumenta la orientación de fibra, la fibra se va situando cada vez más perpendicular a la dirección de la velocidad de corte de la herramienta, provocando que las fuerzas aplicadas por la herramienta sean mayores para compensar la rigidez de la fibra y la compresión generada en el resto de fibras por delante de la herramienta.

Los valores experimentales son mayores que los de las simulaciones.

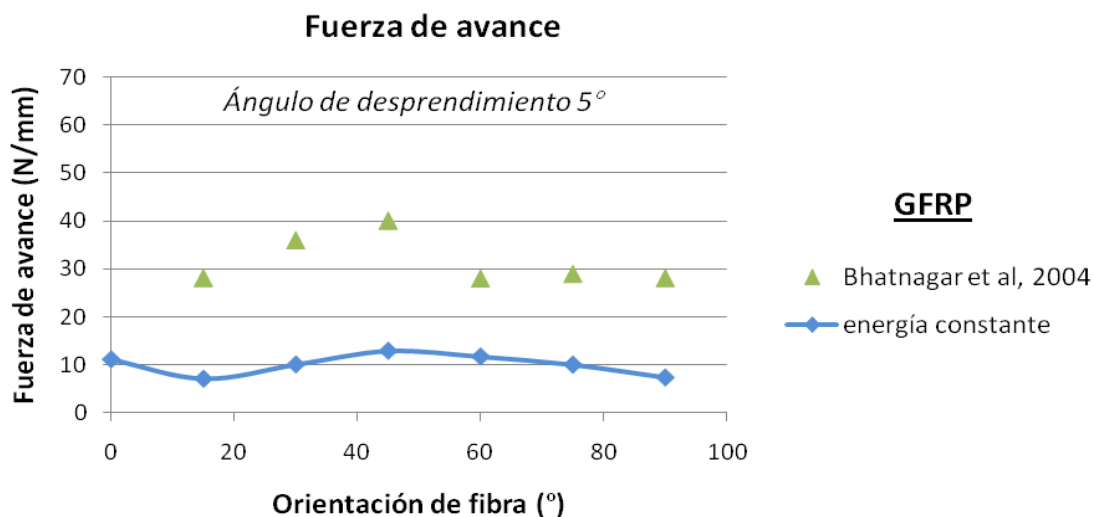


Figura 4.5.- Fuerza de avance para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía constante. Comparación de resultados con bibliografía.

En el caso de la fuerza de avance, se puede decir también que la tendencia es la misma que la curva de los resultados de la bibliografía. Para el caso de -60° es ligeramente diferente, ya que este en los resultados de la bibliografía es menor que el

caso de -75° , y en los resultados de nuestro proyecto es superior. Los valores obtenidos en las simulaciones son menores que los que se obtienen en la bibliografía, al igual que en la fuerza de corte. El valor máximo se obtiene para orientaciones de -45° (13 N/mm y 40 N/mm), después de aumentar progresivamente desde -15° . A partir de -45° la fuerza de avance disminuye gradualmente hasta el caso de -90° . El valor mínimo se da en -15° (7 N/mm y 28 N/mm), siendo este muy cercano al que se obtiene en -90° .

GFRP

Daño matriz a compresión

Energía constante

Ángulo de desprendimiento 5°

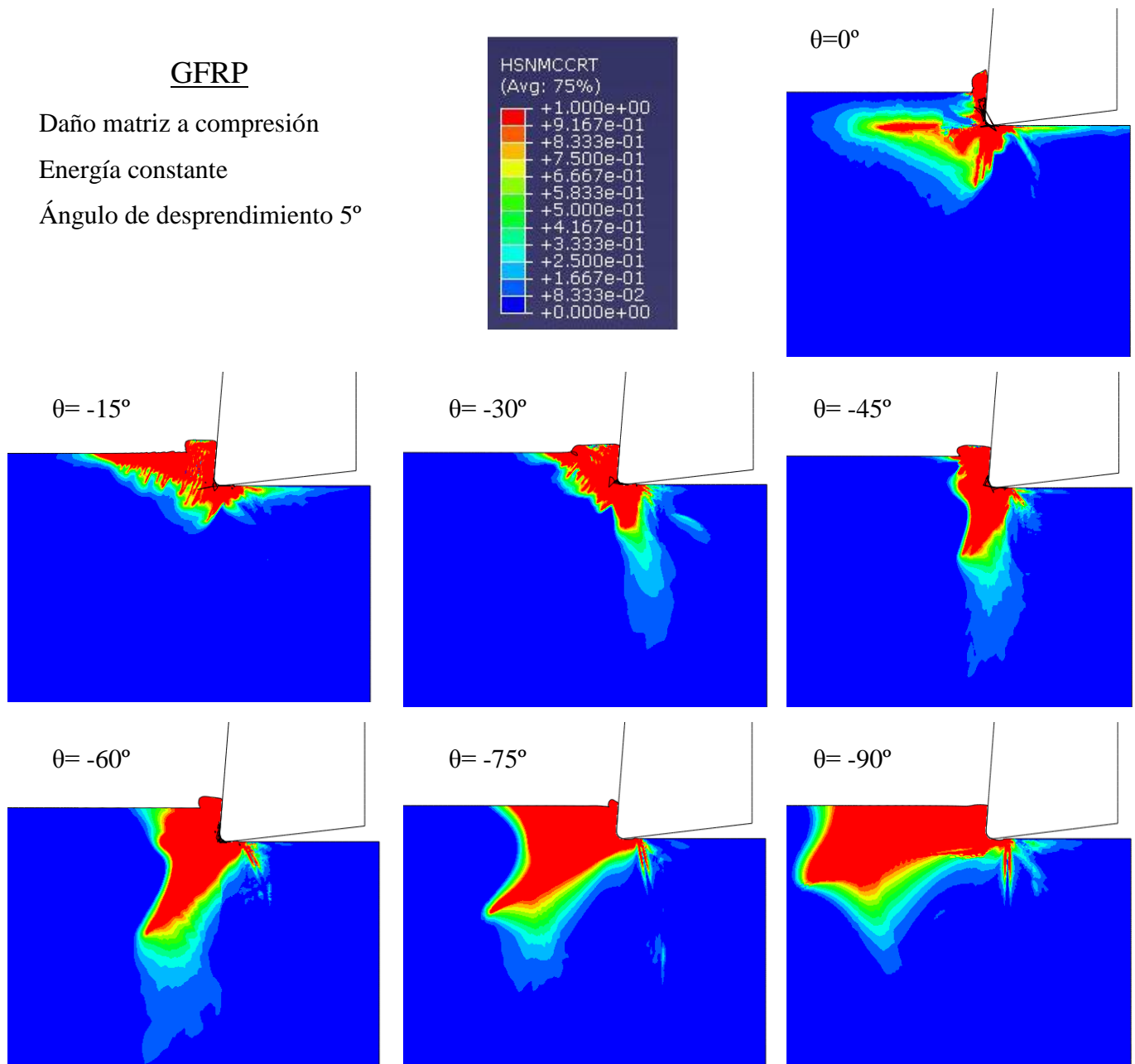


Figura 4.6.-Daño de la matriz a compresión para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía constante.

GFRP

Daño matriz a tracción

Energía constante

Ángulo de desprendimiento 5°

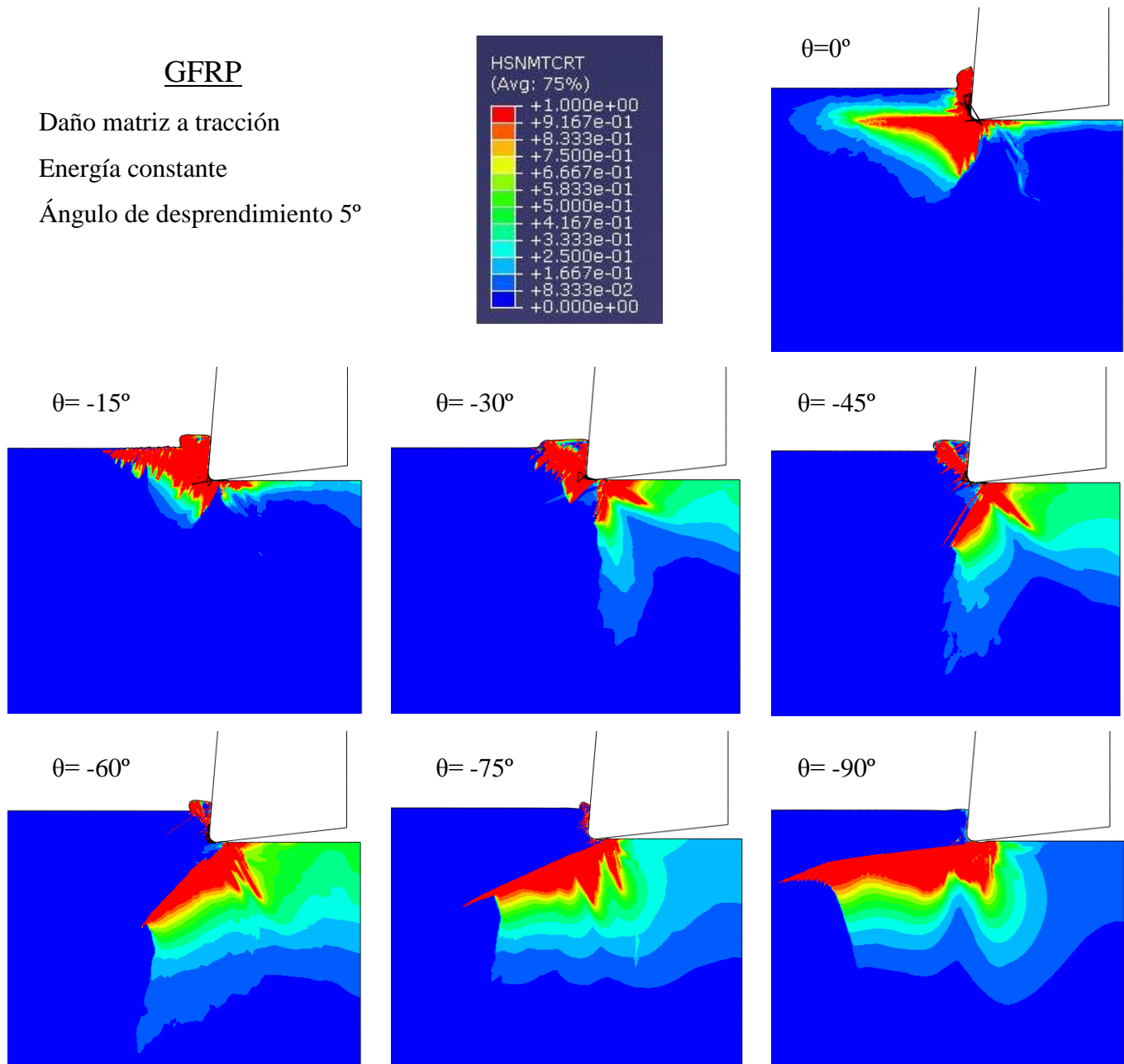


Figura 4.7.-Daño de la matriz a tracción para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía constante.

En las figuras anteriores, se muestra el daño de la matriz a compresión y a tracción para el caso de ángulo de desprendimiento 5° y energía de deformación constante.

En todos los casos, se observa que el daño de la matriz sigue el camino de la orientación de la fibra. En compresión, el daño se propaga tanto por delante de la



herramienta como por debajo de ella para todas las orientaciones de fibra, siendo este efecto más notable para orientaciones bajas (hasta -45°). A altas orientaciones de fibra (-60° , -75° y -90°) predomina la propagación del daño delante de la herramienta.

En tracción, para orientaciones bajas, el daño se propaga delante y debajo de la herramienta, pero para orientaciones altas, sólo se propaga por debajo de la herramienta.

La propagación del daño por debajo de la herramienta, resulta más peligrosa, ya que cuanto más profundo sea, más daño tenemos en nuestra pieza y eso no se puede eliminar de ninguna forma. Sin embargo, si éste lo hace por delante de la herramienta, al ser mecanizada la pieza, éste daño desaparecerá, ya que se corta esa parte de la pieza.

- **Energía no constante**

El valor de la energía de deformación no es constante en todas las direcciones, siendo sus respectivos valores:

$$U_{XT} = 82 \text{ J/m}^2$$

$$U_{XC} = 44 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YT} = 123 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YC} = 185 \text{ J/m}^2$$

A continuación, se expondrán los resultados para el caso de ángulo de desprendimiento 5° y energía no constante en todas las direcciones.

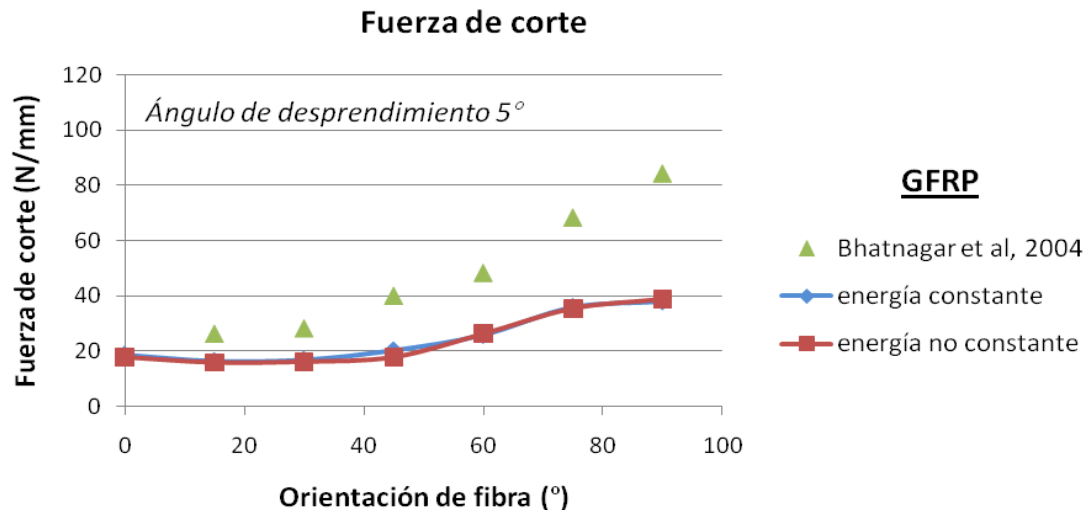


Figura 4.8.- Fuerza de corte para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía no constante. Comparación de resultados con bibliografía y con fuerza de corte con energía constante.

En la gráfica anterior, se comparan tres curvas distintas. Una muestra los resultados de la bibliografía, otra los valores obtenidos en las simulaciones para energía constante y la última los valores obtenidos en las simulaciones para energía no constante. Como puede observarse, la fuerza de corte no varía al cambiar la energía de deformación. Esto puede ser debido a la ductilidad de las fibras de vidrio y a que el comportamiento de la matriz y las fibras es semejante.

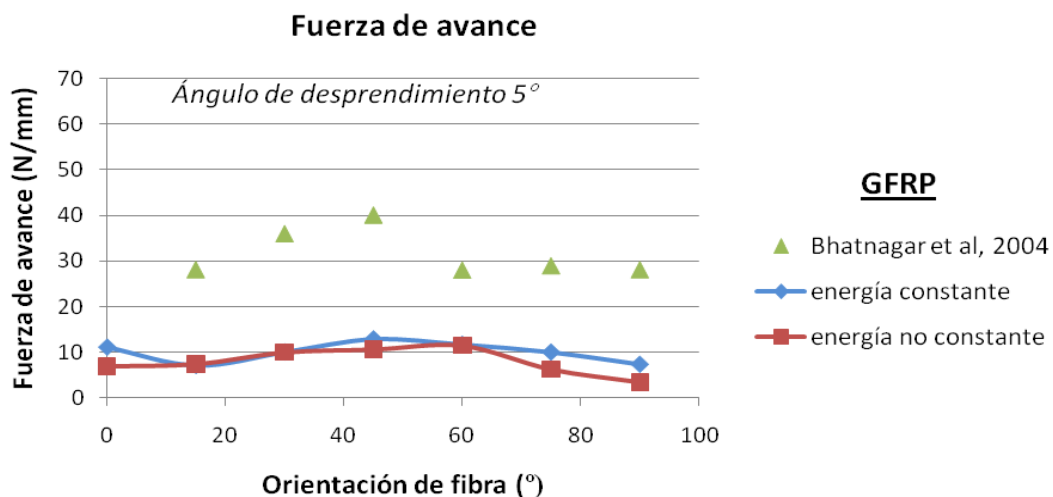


Figura 4.9.- Fuerza de avance para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía no constante. Comparación de resultados con bibliografía y con fuerza de corte con energía constante.

En este caso, la fuerza de avance para energía no constante es diferente a la fuerza de avance para energía constante y aunque la tendencia es la misma, hay más variación en los valores. En el caso de energía no constante, el máximo se da para orientaciones de fibra de -60° (10 N/mm) y el mínimo para -90° (4 N/mm). Para energía constante, como ya se ha comentado en el apartado anterior, el máximo y el mínimo se dan en -15° (7 N/mm) y -45° (65 N/mm) respectivamente.

GFRP

Daño matriz a compresión

Energía no constante

Ángulo de desprendimiento 5°

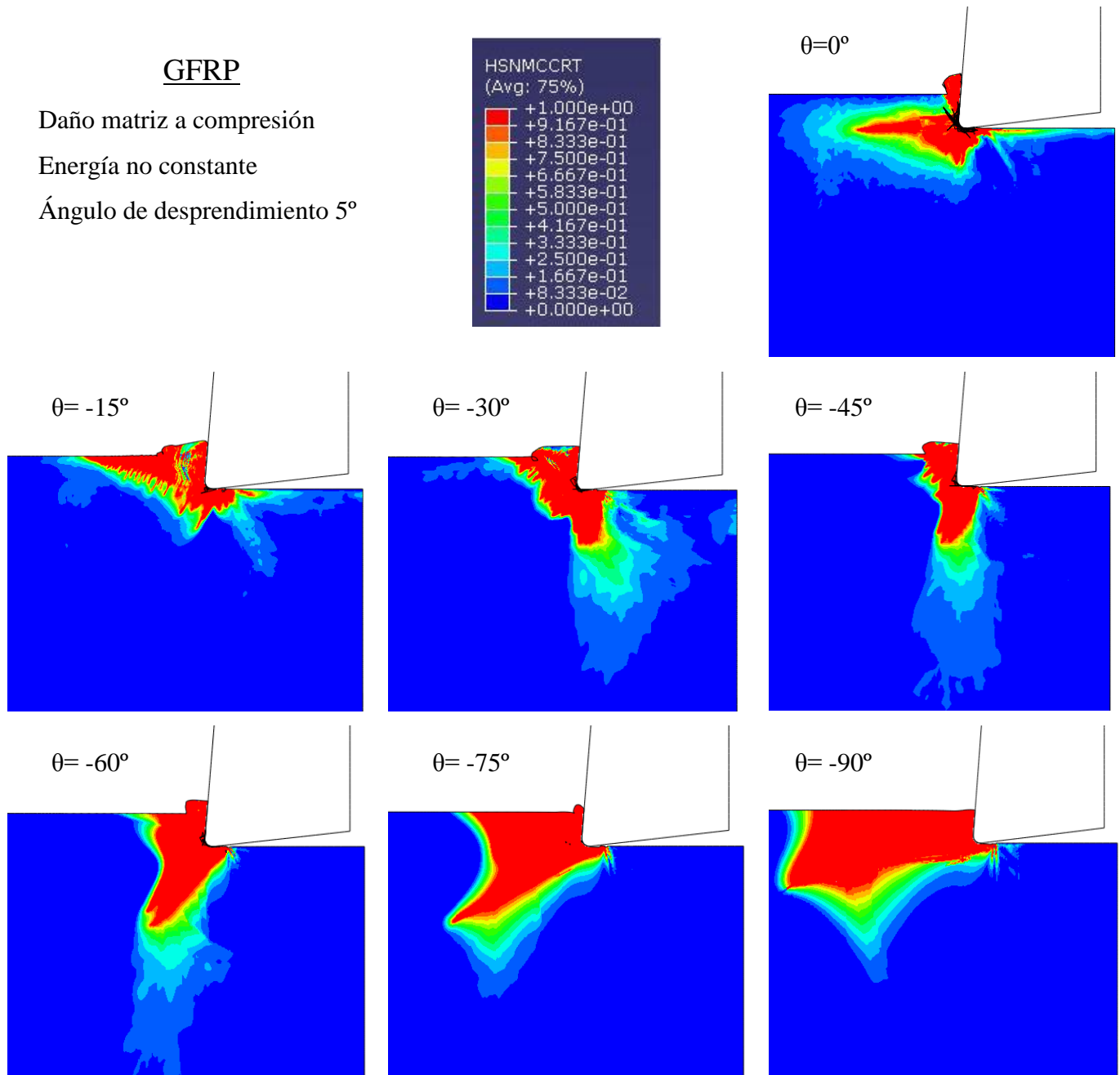


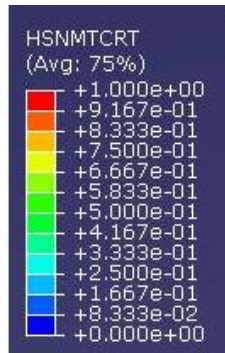
Figura 4.10.-Daño de la matriz a compresión para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía no constante.

GFRP

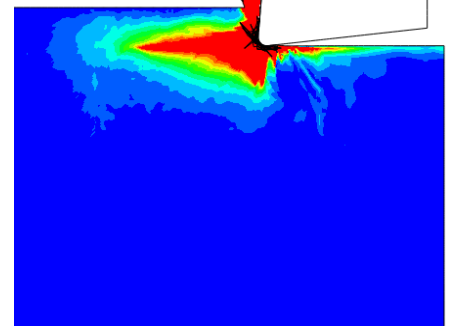
Daño matriz a tracción

Energía no constante

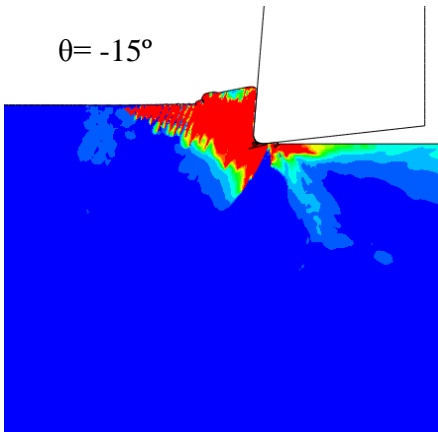
Ángulo de desprendimiento 5°



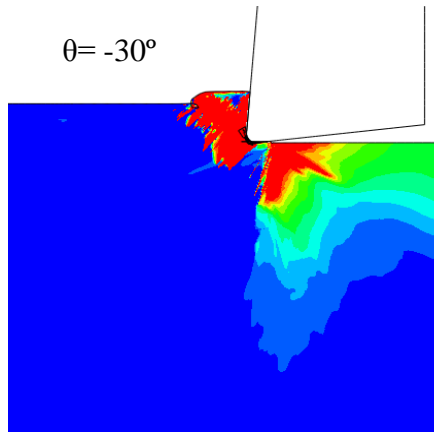
$\theta=0^\circ$



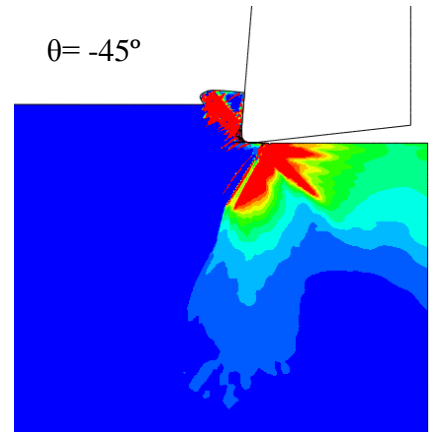
$\theta=-15^\circ$



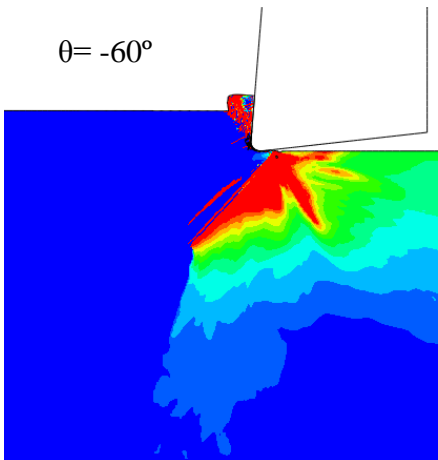
$\theta=-30^\circ$



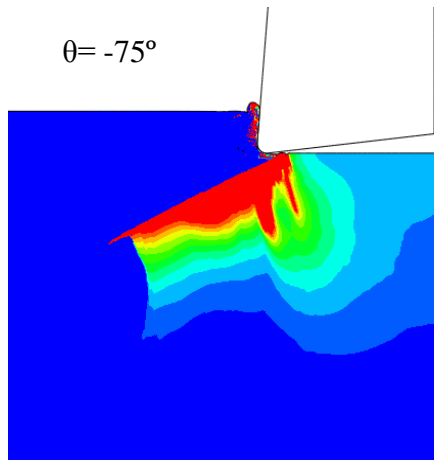
$\theta=-45^\circ$



$\theta=-60^\circ$



$\theta=-75^\circ$



$\theta=-90^\circ$

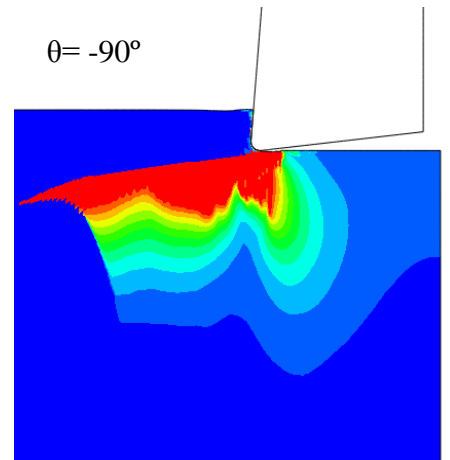


Figura 4.11.-Daño de la matriz a tracción para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 5° y energía no constante.

Al igual que en el caso de energía constante, el daño sigue la dirección de las orientaciones de fibra y se propaga de la misma manera. Para compresión y bajas orientaciones de fibra, el daño se propaga por delante y por debajo de la herramienta y para orientaciones altas, se propaga por delante de la herramienta. Para tracción y bajas orientaciones de fibra, el daño se propaga tanto delante como debajo de la herramienta y para orientaciones altas, por debajo de la herramienta.

- **ÁNGULO DE DESPRENDIMIENTO 0°.-**

- **Energía constante**

El valor de la energía de deformación constante es:

$$U_{XT} = U_{XC} = U_{YT} = U_{YC} = 220 \text{ J/m}^2$$

A continuación, se expondrán los resultados para el caso de ángulo de desprendimiento 0° y energía constante en todas las direcciones.

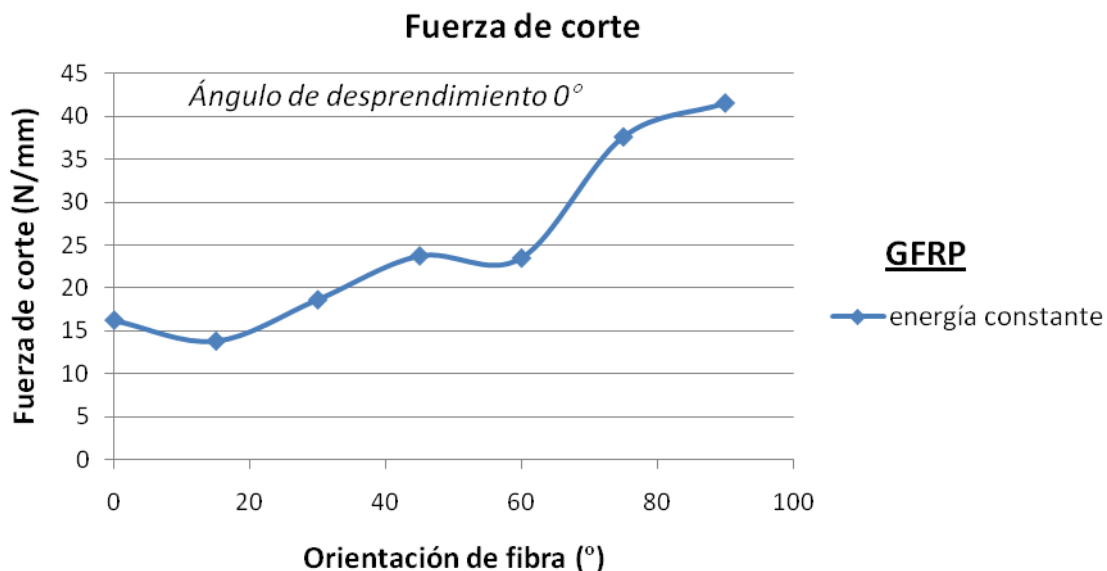


Figura 4.12.- Fuerza de corte para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.

En este caso, no podemos comparar resultados con los experimentos de la bibliografía, ya que hasta ahora no se han realizado experimentos para ángulos de desprendimiento de 0°. En el apartado siguiente se estudiará el efecto del ángulo de desprendimiento.

En la gráfica, se puede ver que la fuerza de corte es máxima para -90° (42 N/mm) y mínima para -15° (14 N/mm). Esta aumenta progresivamente hasta -60° y a partir de este caso, aumenta fuertemente hasta -90°.

Como se ha comentado en el apartado anterior (ángulo de desprendimiento 5°) la tendencia de la curva es ascendente porque las fibras son cada vez más perpendiculares a la dirección de la velocidad de corte de la herramienta y las fuerzas se ven obligadas a aumentar su valor para compensar la rigidez de la fibra y la compresión generada en el resto de fibras por delante de la herramienta.

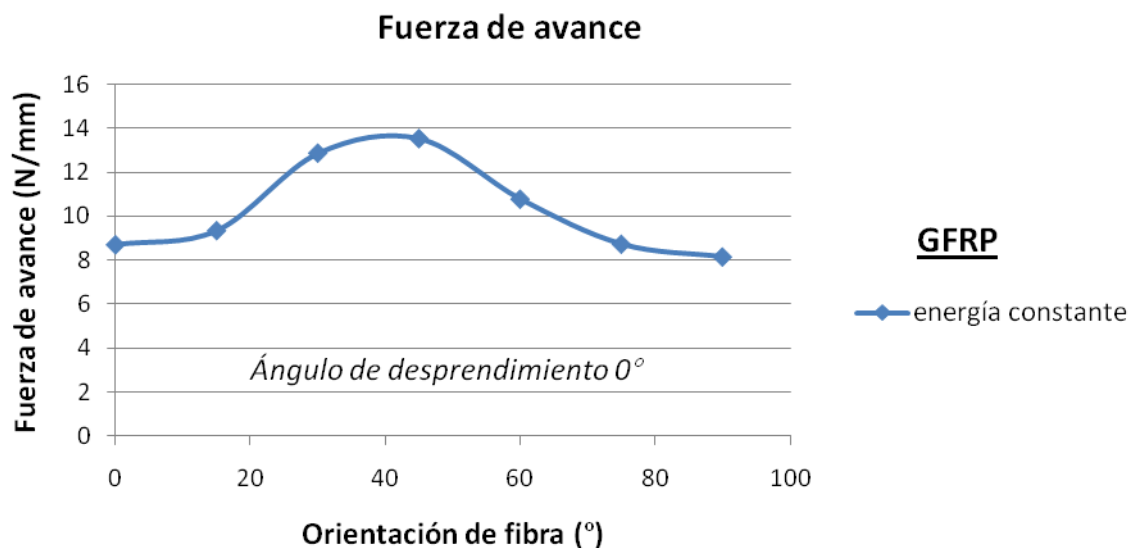


Figura 4.13.- Fuerza de avance para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.

En el caso de la fuerza de avance, el máximo se obtiene para -45° (14 N/mm) y el mínimo para -90° (8 N/mm). Esta aumenta desde 0° hasta -45° y luego disminuye hasta -90° .

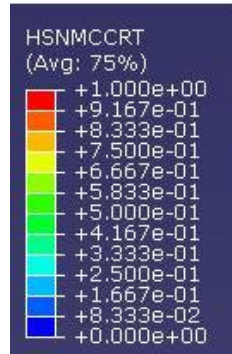
Como se puede observar en las figuras 4.12 y 4.13, El daño tanto a tracción como a compresión sigue la dirección de las orientaciones de fibra y se propaga de la misma forma que para ángulo de desprendimiento 5° . En este caso respecto el anterior, destaca la propagación del daño para orientación 0° , que es mayor debajo de la herramienta que para el caso de ángulo de desprendimiento 5° . Esto puede deberse a los efectos de pandeo que se producen en la fibra, es decir, el comportamiento de la fibra se asemeja al de una viga que se somete a un axil de compresión en uno de sus extremos.

GFRP

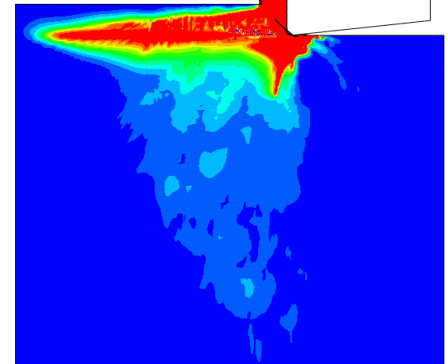
Daño matriz a compresión

Energía constante

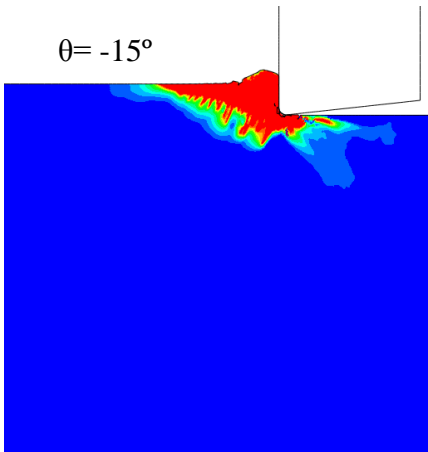
Ángulo de desprendimiento 0°



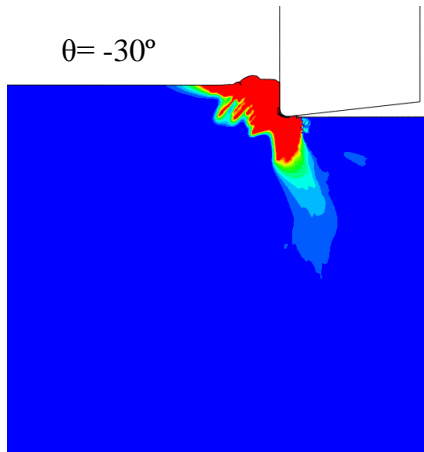
$\theta=0^\circ$



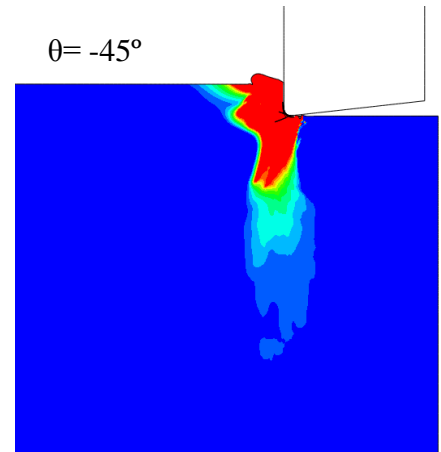
$\theta=-15^\circ$



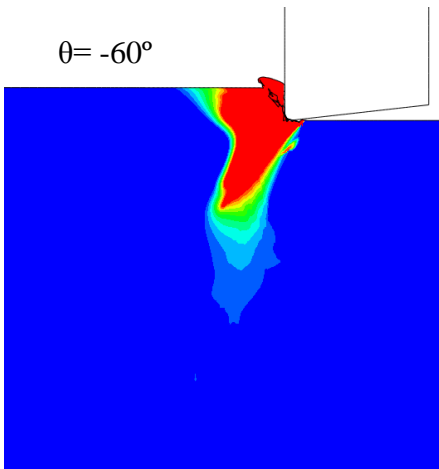
$\theta=-30^\circ$



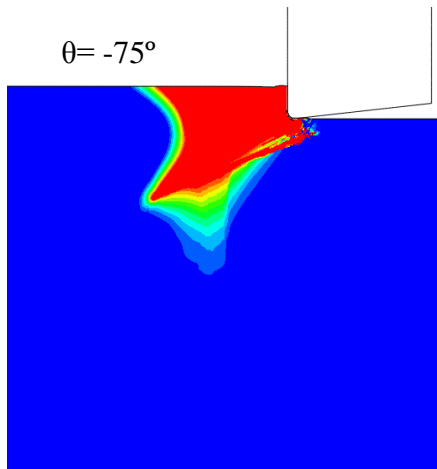
$\theta=-45^\circ$



$\theta=-60^\circ$



$\theta=-75^\circ$



$\theta=-90^\circ$

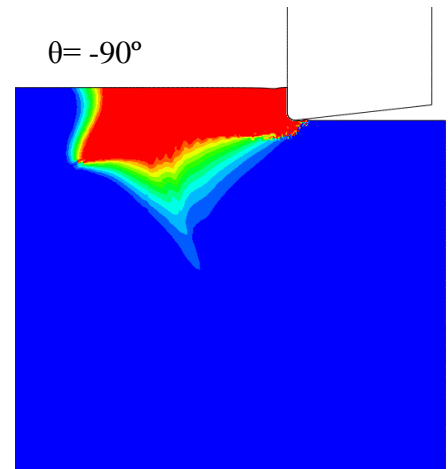


Figura 4.14.-Daño de la matriz a compresión para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.

GFRP

Daño matriz a tracción

Energía constante

Ángulo de desprendimiento 0°

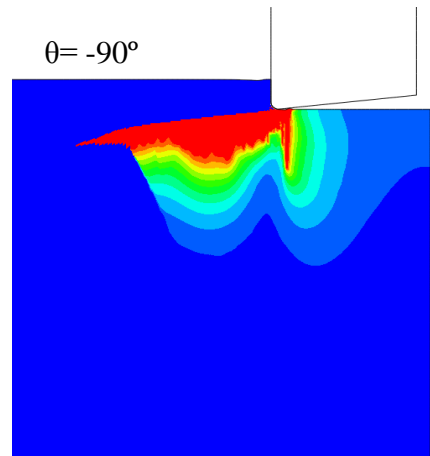
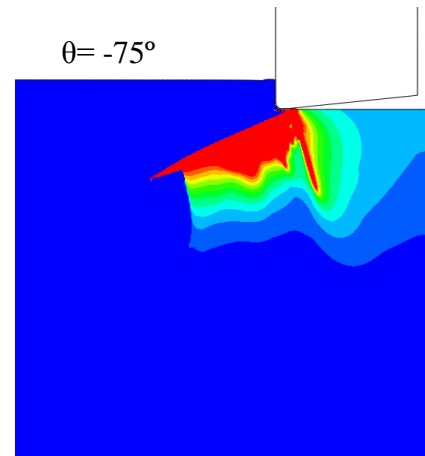
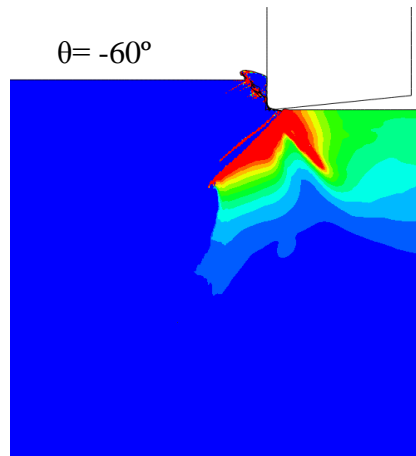
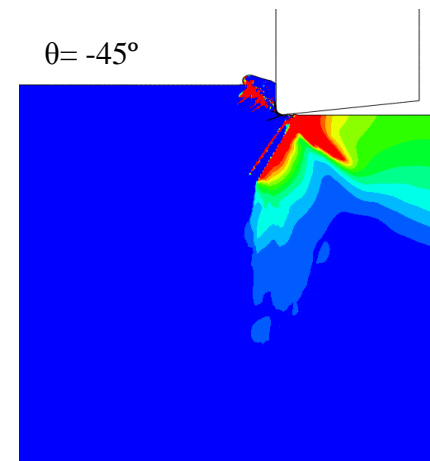
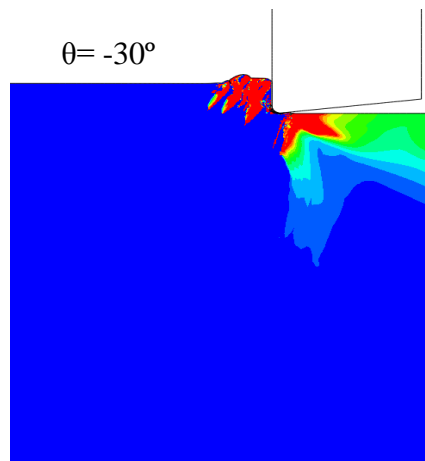
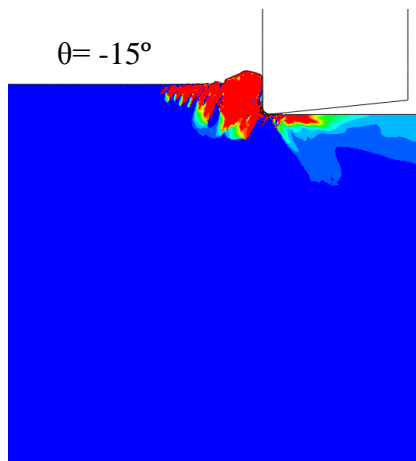
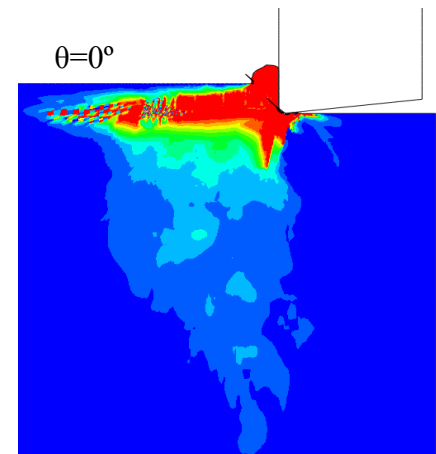
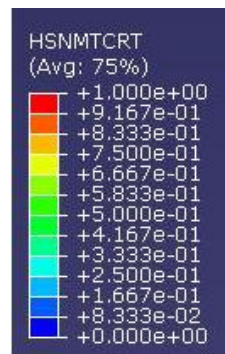


Figura 4.15.-Daño de la matriz a tracción para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.

- **Energía no constante**

El valor de la energía de deformación no es constante en todas las direcciones, siendo sus respectivos valores:

$$U_{XT} = 82 \text{ J/m}^2$$

$$U_{XC} = 44 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YT} = 123 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YC} = 185 \text{ J/m}^2$$

A continuación, se expondrán los resultados para el caso de ángulo de desprendimiento 0° y energía no constante en todas las direcciones.

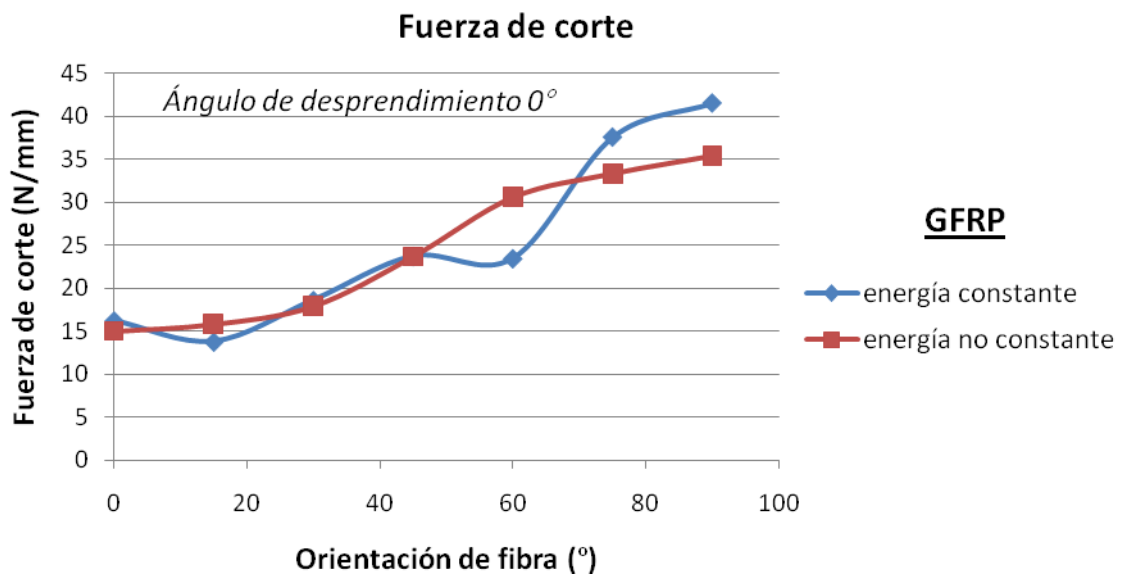


Figura 4.16.- Fuerza de corte para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante. Comparación de resultados con fuerza de corte con energía constante.

En este caso observamos que el cambio de la energía de deformación no varía mucho las fuerzas de corte (fig 4.16), ni las fuerzas de avance (fig 4.17). Esto puede deberse, a la ductilidad de las fibras de vidrio y a que el comportamiento de la matriz y las fibras es parecido, por lo que el cambio de energía no influye. Esto último, se explicará más adelante con más detalle al hacer la comparación entre los materiales reforzados con fibra de vidrio y fibras de carbono.

Los máximos y los mínimos no se dan exactamente en las mismas orientaciones de fibra que para energía de deformación constante y fuerza de corte, pero la variación es insignificante y la tendencia es la misma. En la fuerza de corte, varía el mínimo que en vez de estar en -15° como pasaba con energía constante, se encuentra en 0° . En la fuerza de avance se mantienen el mínimo y máximo.

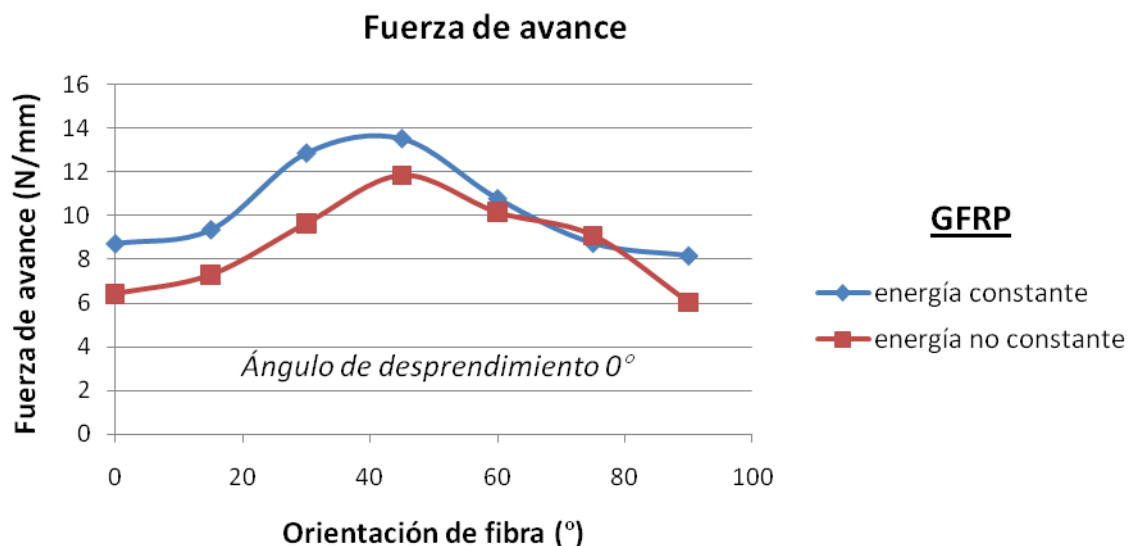


Figura 4.17.- Fuerza de avance para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante. Comparación de resultados con fuerza de corte con energía constante.

Se observa en las figuras 4.18 y 4.19 que al igual que en el caso de energía de deformación constante, la variación del ángulo de desprendimiento no afecta mucho al daño de la matriz, excepto en el caso de 0° , que con ángulo de desprendimiento de 0° es bastante mayor. Esto puede deberse a los efectos de pandeo a los que está sometida esta fibra, es decir, el comportamiento de la fibra se asemeja al de una viga que se somete a un axil de compresión en uno de sus extremos.

GFRP

Daño matriz a compresión

Energía no constante

Ángulo de desprendimiento 0°

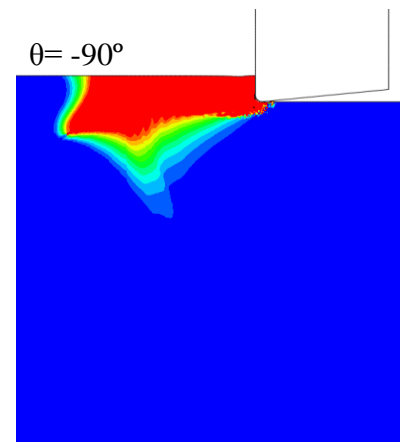
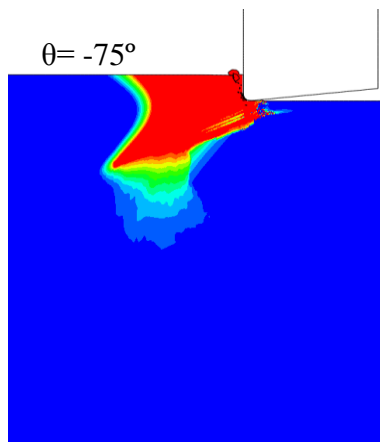
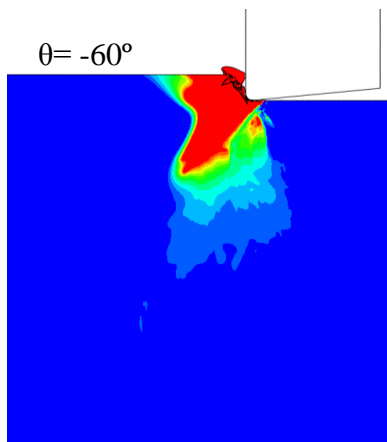
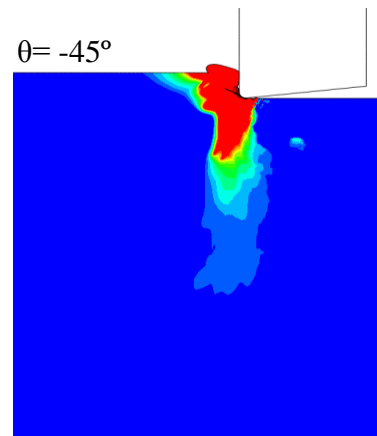
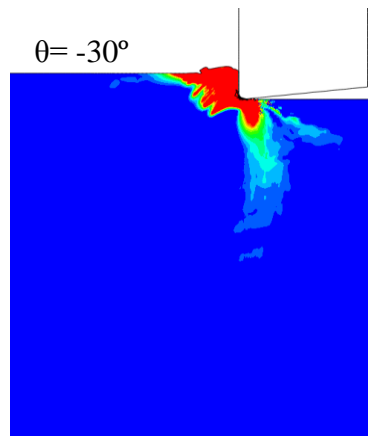
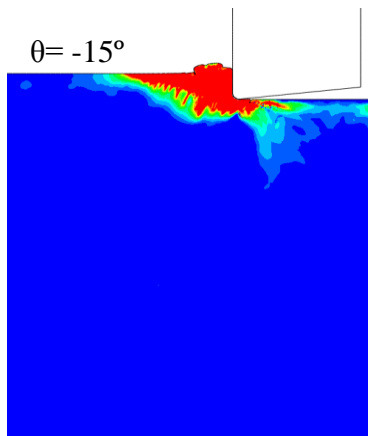
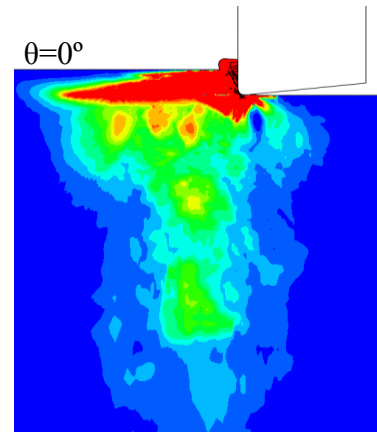
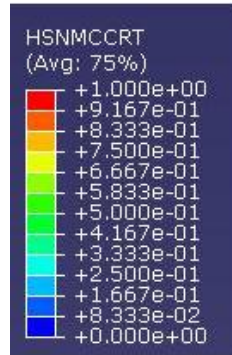


Figura 4.18.-Daño de la matriz a compresión para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante.

GFRP

Daño matriz a tracción

Energía no constante

Ángulo de desprendimiento 0°

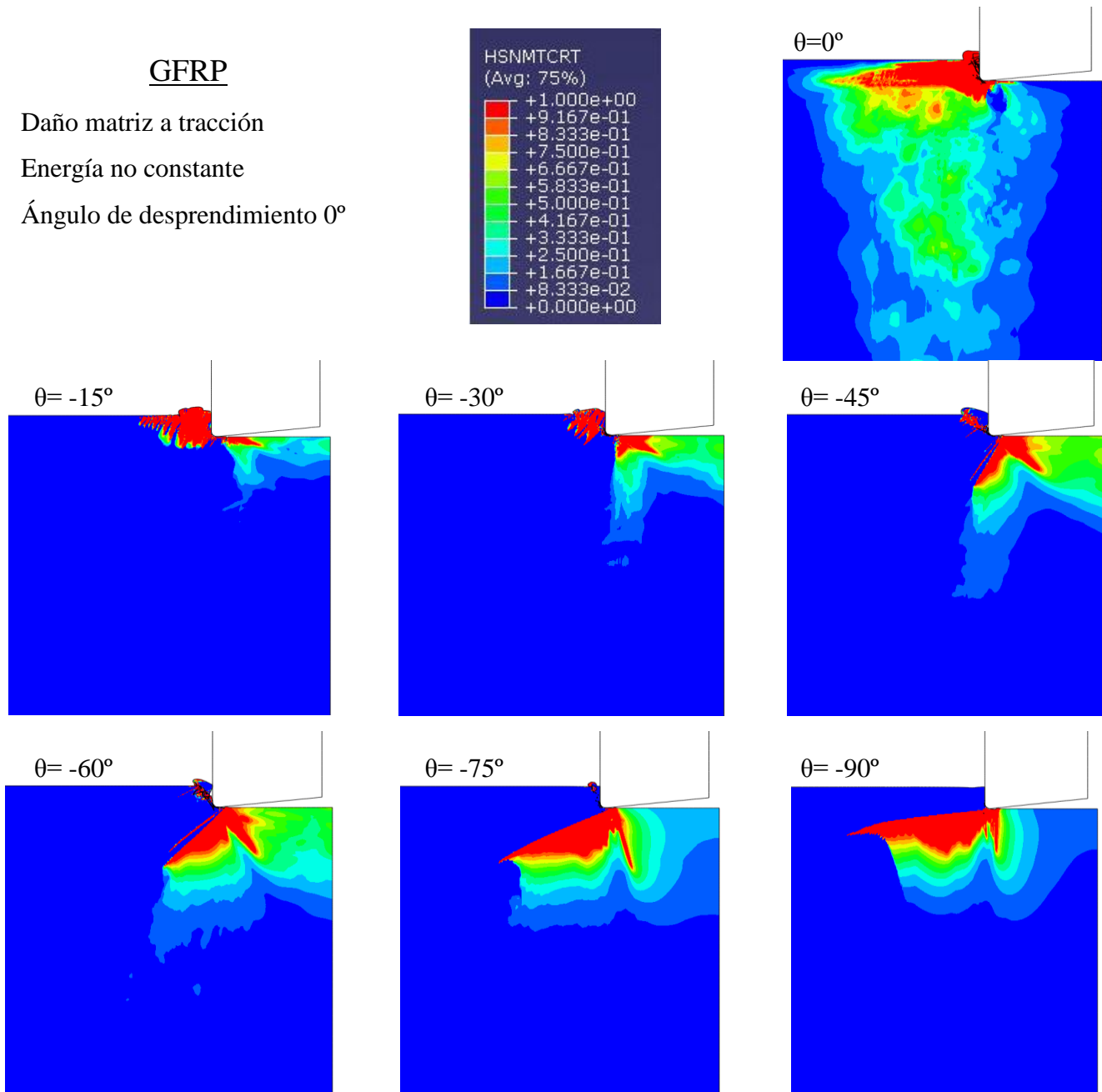


Figura 4.19.-Daño de la matriz a tracción para GFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante.

- **EFEECTO DEL ÁNGULO DE DESPRENDIMIENTO.-**

- **Energía constante**

El valor de la energía de deformación constante es:

$$U_{XT} = U_{XC} = U_{YT} = U_{YC} = 220 \text{ J/m}^2$$

A continuación, se expondrán los resultados para los casos de ángulo de desprendimiento 0°, 5° y energía constante en todas las direcciones.

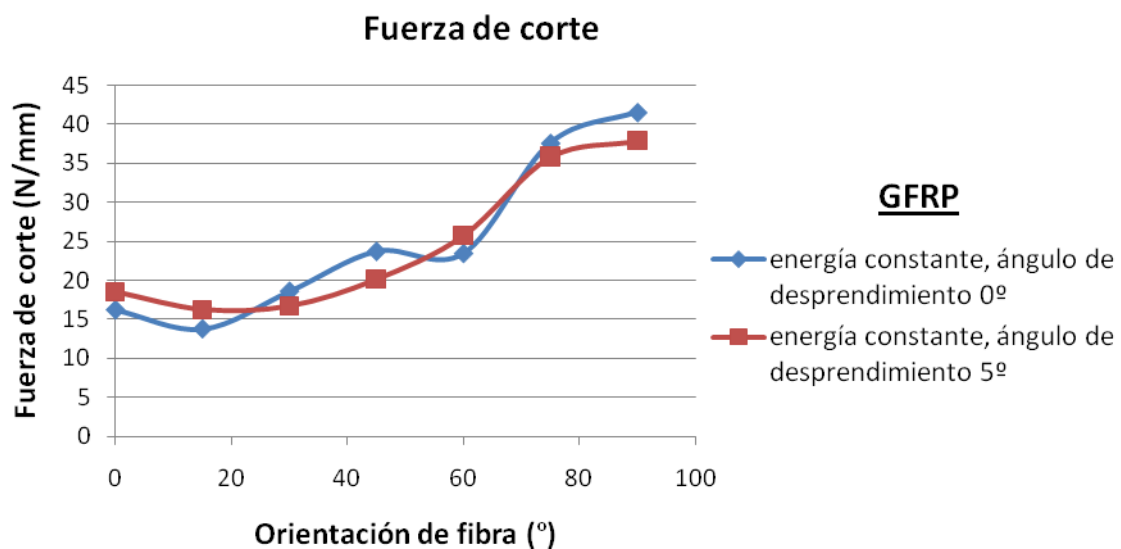


Figura 4.20.- Efecto del ángulo de desprendimiento sobre la fuerza de corte para el caso de GFRP con energía constante.

Si observamos la gráfica de la fuerza de corte, en la que se comparan los datos obtenidos para energía constante y distinto ángulo de desprendimiento (5° y 0°), vemos que los resultados obtenidos son similares. Por eso podemos concluir que dicho ángulo no tiene ningún efecto sobre la fuerza de corte para el caso GFRP y energía de deformación constante en las cuatro direcciones.

El valor mínimo se encuentra en el caso de orientación de fibra de -15° y el máximo en -90°. Las dos curvas tienen una tendencia ascendente en las que la fuerza de

corte aumentan su valor progresivamente hasta el caso de -60° , para aumentar fuertemente hasta -90° .

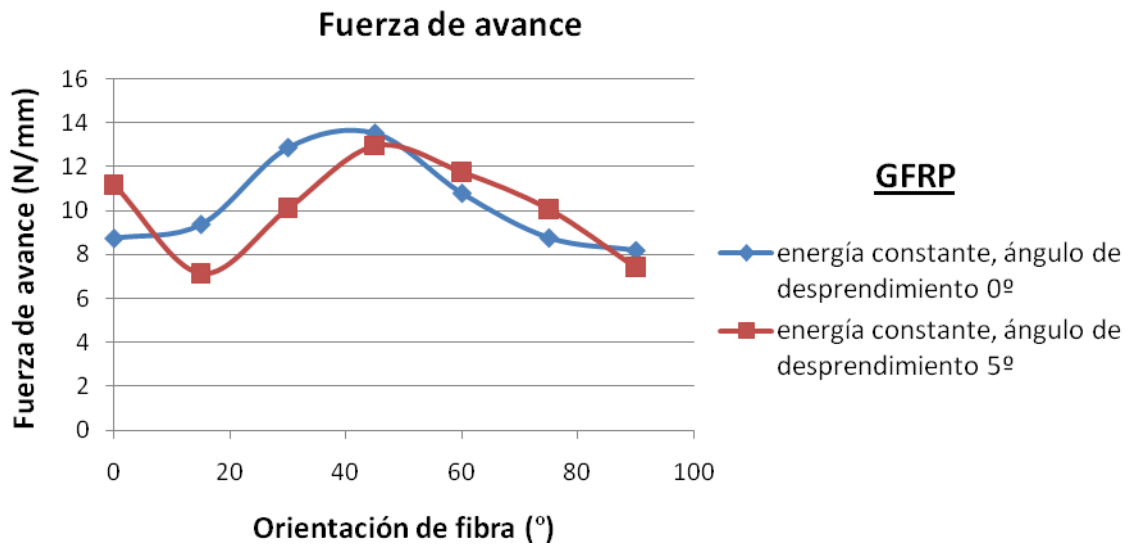


Figura 4.21.- Efecto del ángulo de desprendimiento sobre la fuerza de avance para el caso de GFRP con energía constante.

Al igual que en el caso de la fuerza de corte, en la fuerza de avance para GFRP con energía constante no existe ningún efecto que dependa del ángulo de desprendimiento. Los resultados tienen la misma tendencia y valores muy similares, dándose el máximo para una orientación de fibra de -45° ambas curvas y el mínimo para -15° en el caso de ángulo de desprendimiento 5° y en -90° para el caso de ángulo de desprendimiento 0° .

- **Energía no constante**

El valor de la energía de deformación no es constante en todas las direcciones, siendo sus respectivos valores:

$$U_{XT} = 82 \text{ J/m}^2$$

$$U_{XC} = 44 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YT} = 123 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YC} = 185 \text{ J/m}^2$$

A continuación, se expondrán los resultados para los casos de ángulo de desprendimiento 5°, 0° y energía no constante en todas las direcciones.

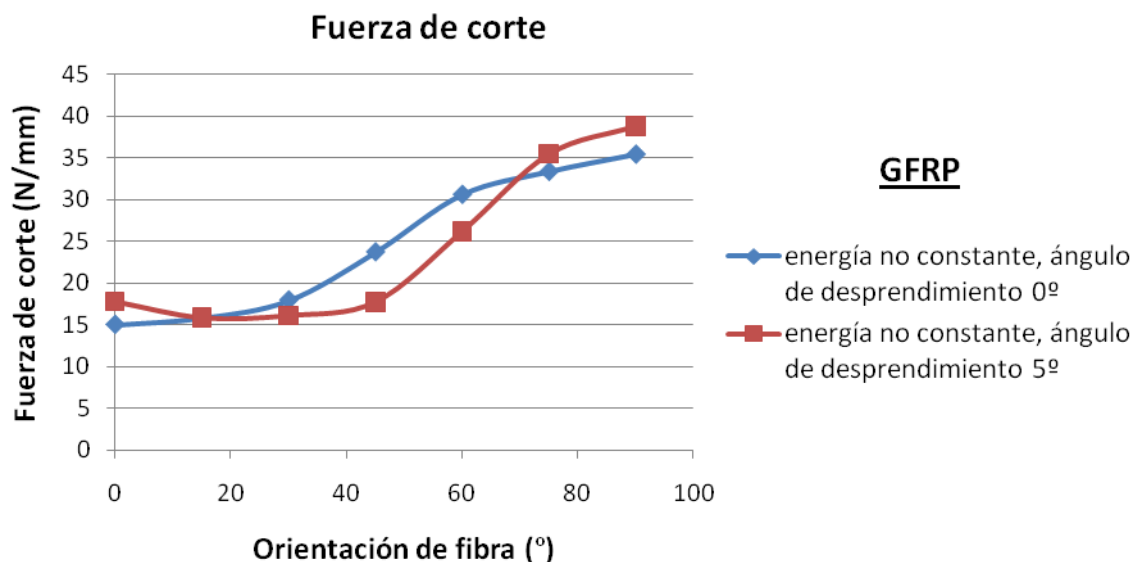


Figura 4.22.- Efecto del ángulo de desprendimiento sobre la fuerza de corte para el caso de GFRP con energía no constante.

Para el caso en el que la energía de deformación no es constante el ángulo de desprendimiento tampoco tiene un claro efecto sobre las fuerzas de corte y avance. Estas son prácticamente iguales y siguen la misma tendencia.

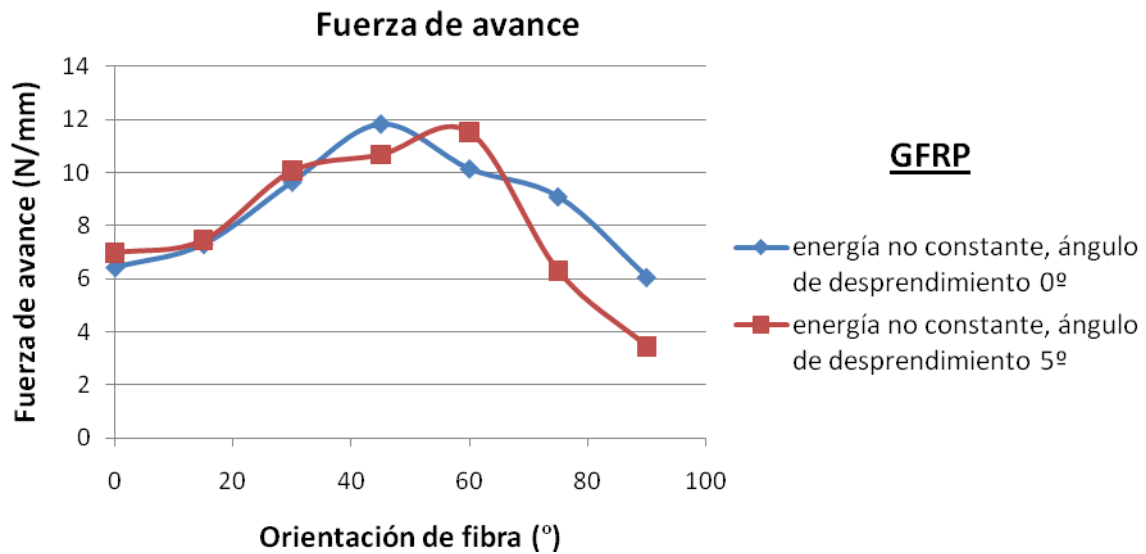


Figura 4.23.- Efecto del ángulo de desprendimiento sobre la fuerza de avance para el caso de GFRP con energía no constante.

Respecto al daño de la matriz, tanto para energía de deformación constante como no constante, se puede observar en las figuras 4.6, 4.7, 4.10, 4.11, 4.14, 4.15, 4.18 y 4.19, que este no varía mucho al variar el ángulo de desprendimiento, ni la energía de deformación. Es algo mayor en el caso de 5°, excepto para orientaciones de 0°, que con ángulo de desprendimiento de 0° es bastante mayor. La posible explicación a este hecho, es que el caso de 0° es un poco especial, ya que al estar la fibra colocada en la dirección del avance de la herramienta, cuando esta choca con la fibra, se producen efectos de pandeo, es decir, el comportamiento de la fibra se asemeja al de una viga que se somete a un axil de compresión en uno de sus extremos. Como se ha comentado al principio del capítulo, a los resultados de fibra 0° obtenidos en las simulaciones del proyecto, no se les da demasiada importancia, ya que en los ensayos de la bibliografía no se muestran experimentos para este caso y raras veces se efectúa un mecanizado con la fibra orientada a 0°. Esto se debe a que es muy difícil que esta se distribuya en la matriz sin orientación alguna.

4.2.- MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO (CFRP)

Para los CFRP distinguimos sólo dos casos para un mismo ángulo de desprendimiento (0°). Estos son: con energía de deformación constante en todas las direcciones o con energía de deformación no constante. Como en el caso del vidrio, estos casos son calculados para distintas orientaciones de fibra.

Las simulaciones no pueden ser comparadas con resultados experimentales de la bibliografía porque no hay datos sobre experimentos ni ensayos con fibra de carbono. Por esto, no se puede decir qué gráfica es mas semejante a la realidad, ni en valor ni en forma.

- Energía constante

El valor de la energía de deformación constante es:

$$U_{XT} = U_{XC} = U_{YT} = U_{YC} = 220 \text{ J/m}^2$$

A continuación, se expondrán los resultados para el caso de ángulo de desprendimiento 0° y energía constante en todas las direcciones.

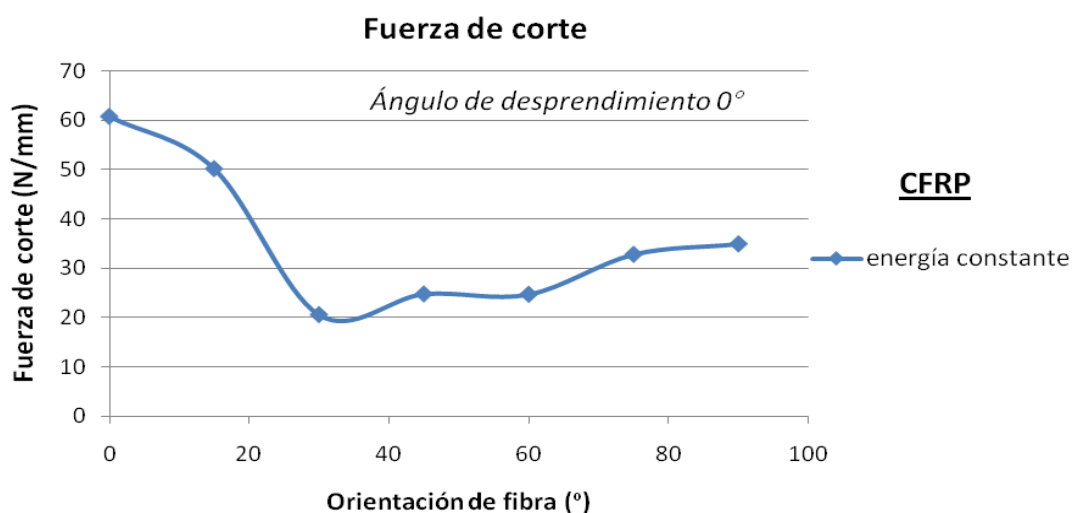


Figura 4.24.- Fuerza de corte para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.

Para el caso del carbono con energía constante la máxima fuerza de corte se da para el caso de 0° (61 N/mm) y la mínima para -30° (21 N/mm). La tendencia es ascendente una vez que se produce el gran descenso de la fuerza desde 0° a -30° . Las fuerzas aumentan progresivamente hasta el caso de -60° y luego fuertemente hasta -90° , siendo muy similares para los caso de -45° y -60° .

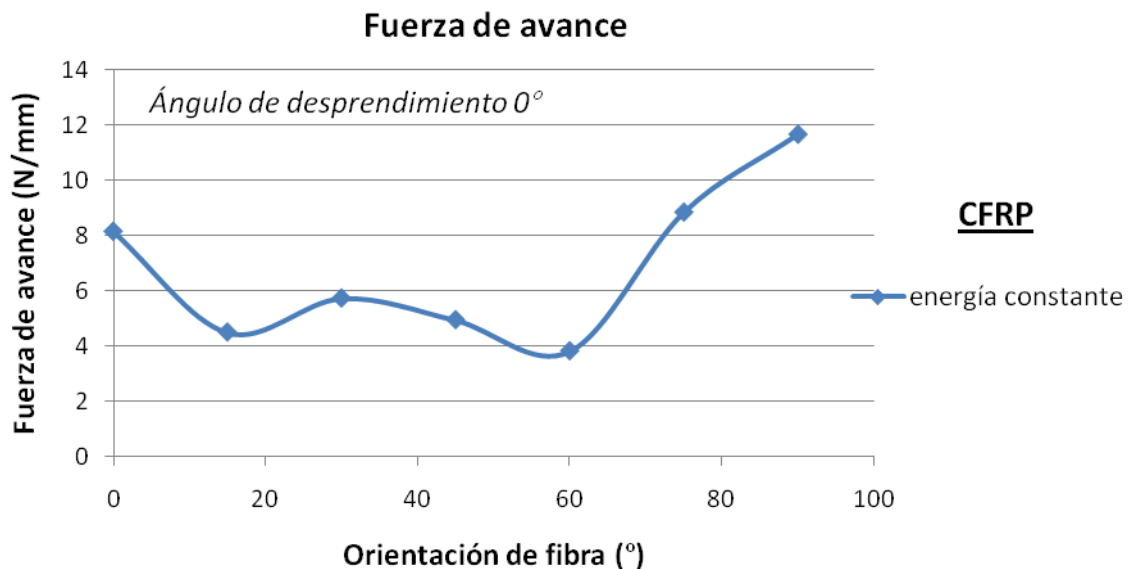


Figura 4.25.- Fuerza de avance para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.

La fuerza de avance sigue una tendencia muy variable, ya que esta sube y baja repetidas veces. El valor máximo de la fuerza se da para la orientación de fibra de -90° (12 N/mm) y el mínimo valor para -60° (4 N/mm). En este caso, no existe una variación progresiva, sino que los cambios son muy pronunciados.

CFRP

Daño matriz a compresión

Energía constante

Ángulo de desprendimiento 0°

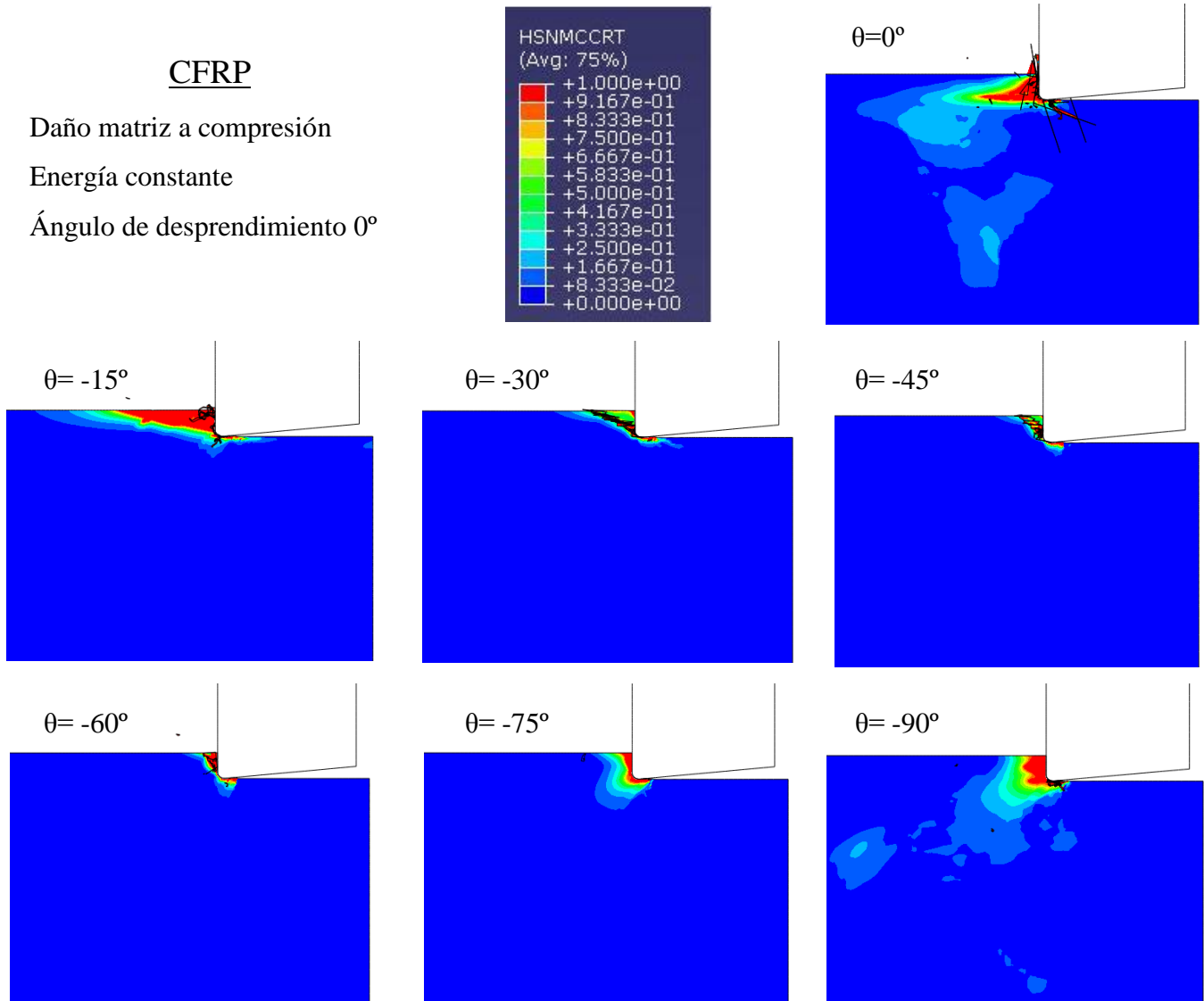


Figura 4.26.-Daño de la matriz a compresión para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.

CFRP

Daño matriz a tracción

Energía constante

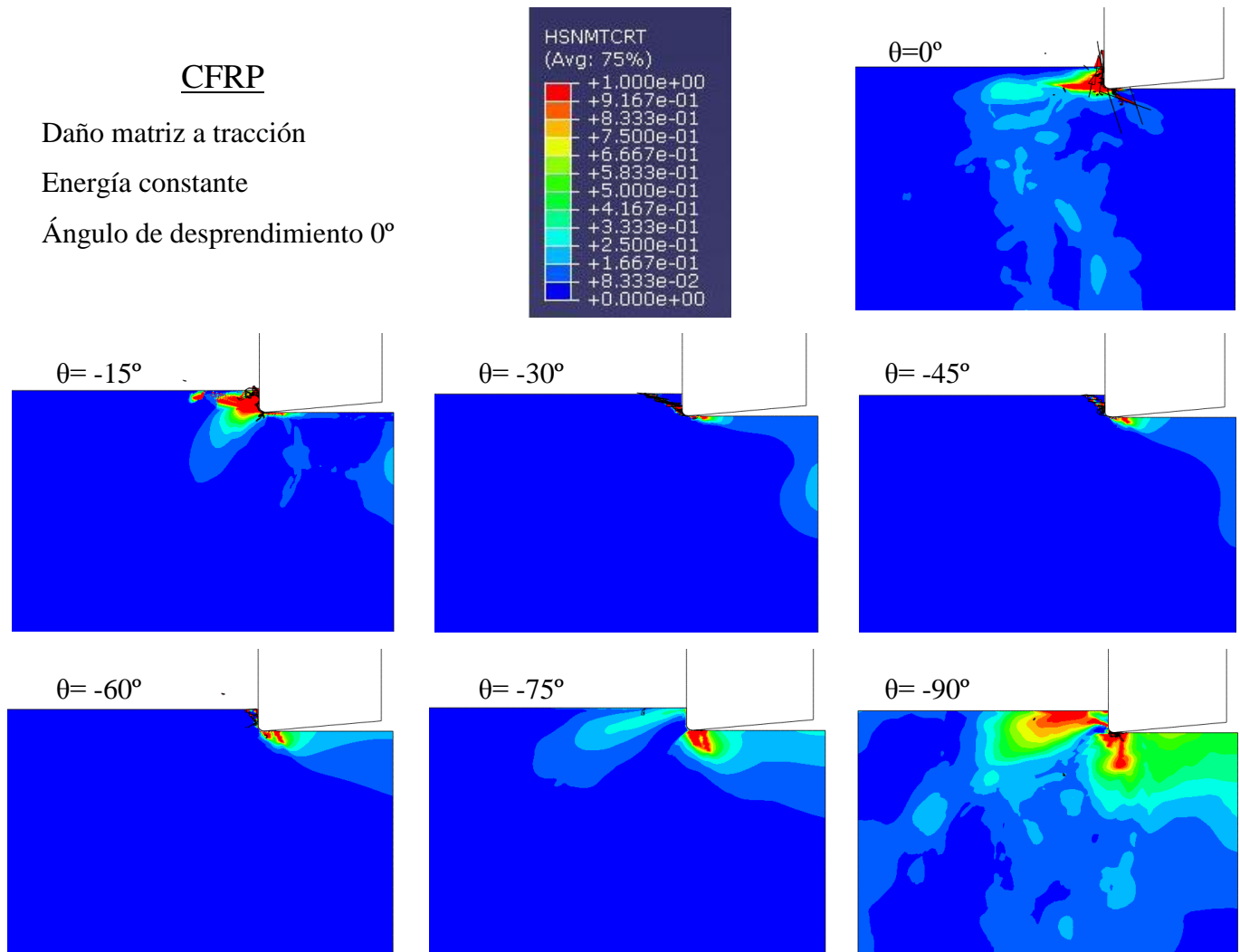
Ángulo de desprendimiento 0° 

Figura 4.27.-Daño de la matriz a tracción para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía constante.

El daño de la matriz a compresión y a tracción para energía constante se propaga según la orientación de la fibra en cada caso, siendo mayor, el daño de la matriz a compresión.

En ambos casos, el daño tiende a estar localizado en la zona de formación de viruta y no hay una propagación muy pronunciada delante y debajo de la herramienta como en el caso de los GFRP.

- **Energía no constante**

El valor de la energía de deformación no es constante en todas las direcciones, siendo sus respectivos valores:

$$U_{XT} = 194 \text{ J/m}^2$$

$$U_{XC} = 112 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YT} = 291 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YC} = 437 \text{ J/m}^2$$

A continuación, se expondrán los resultados para el caso de ángulo de desprendimiento 0° y energía no constante en todas las direcciones.

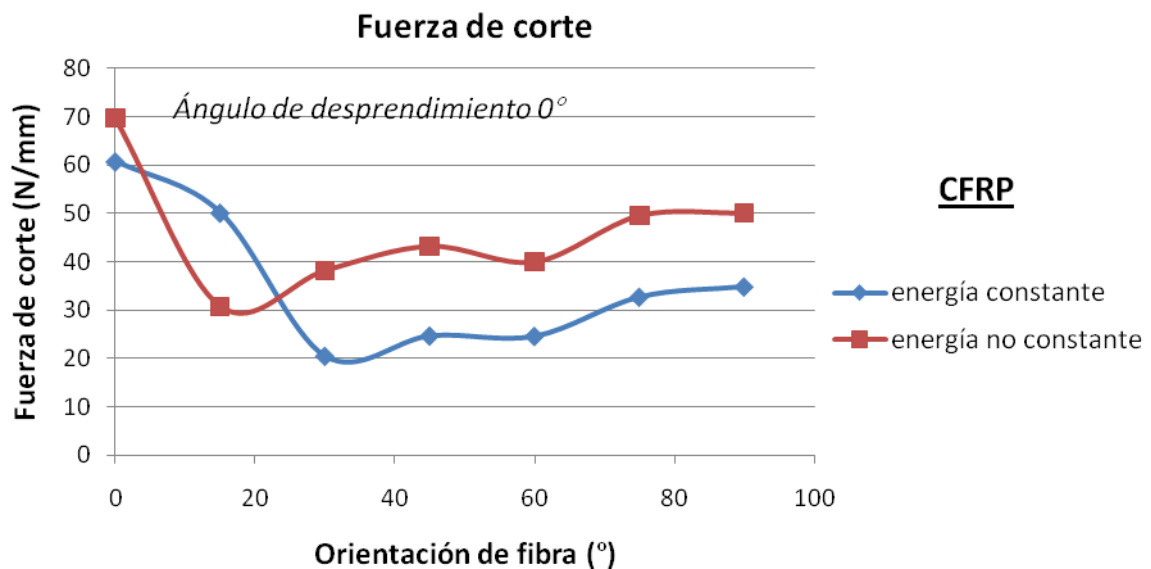


Figura 4.28.- Fuerza de corte para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante. Comparación con la fuerza de corte para energía constante.

Las principales diferencias de las fuerzas de corte entre los casos de CFRP con energía constante y no constante son los valores más elevados para este último caso, y la tendencia es prácticamente ascendente desde -15° . Para energía no constante el máximo se da en 0° (70 N/mm) y el mínimo en -15° (31 N/mm). En el caso de -60° se produce un pequeño descenso, para subir fuertemente después hasta -75° .

La diferencia que existe entre la curva para el caso de energía constante y para el caso de energía no constante, probablemente es debida a que las fibras de carbono tienen un comportamiento frágil y por tanto, el comportamiento de la matriz y las fibras es completamente distinto.

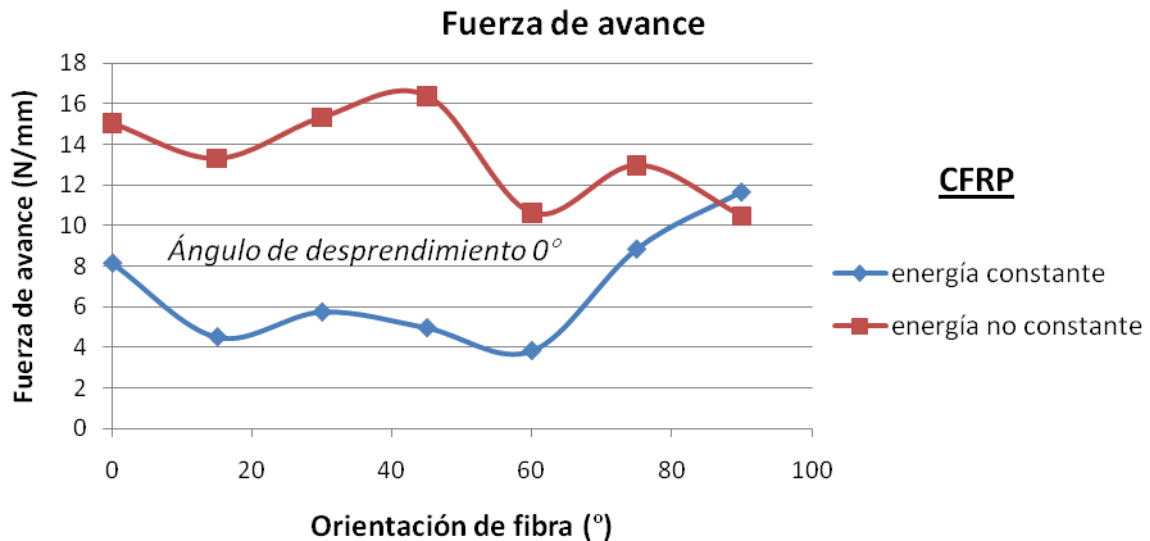


Figura 4.29.- Fuerza de avance para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante. Comparación con la fuerza de corte para energía constante.

En el caso de las fuerzas de avance, la tendencia es algo distinta para el caso de energía de deformación no constante y el de energía constante, ya que para el caso de -90° la fuerza disminuye con respecto a la de -75° en el caso de energía de deformación no constante y aumenta en el caso de energía de deformación constante. Los valores para energía no constante son bastante superiores a los de energía constante, superando en algunos casos el doble de valor.

El valor máximo se da para -45° (16 N/mm) y el mínimo para -90° (10 N/mm).

CFRP

Daño matriz a compresión

Energía no constante

Ángulo de desprendimiento 0°

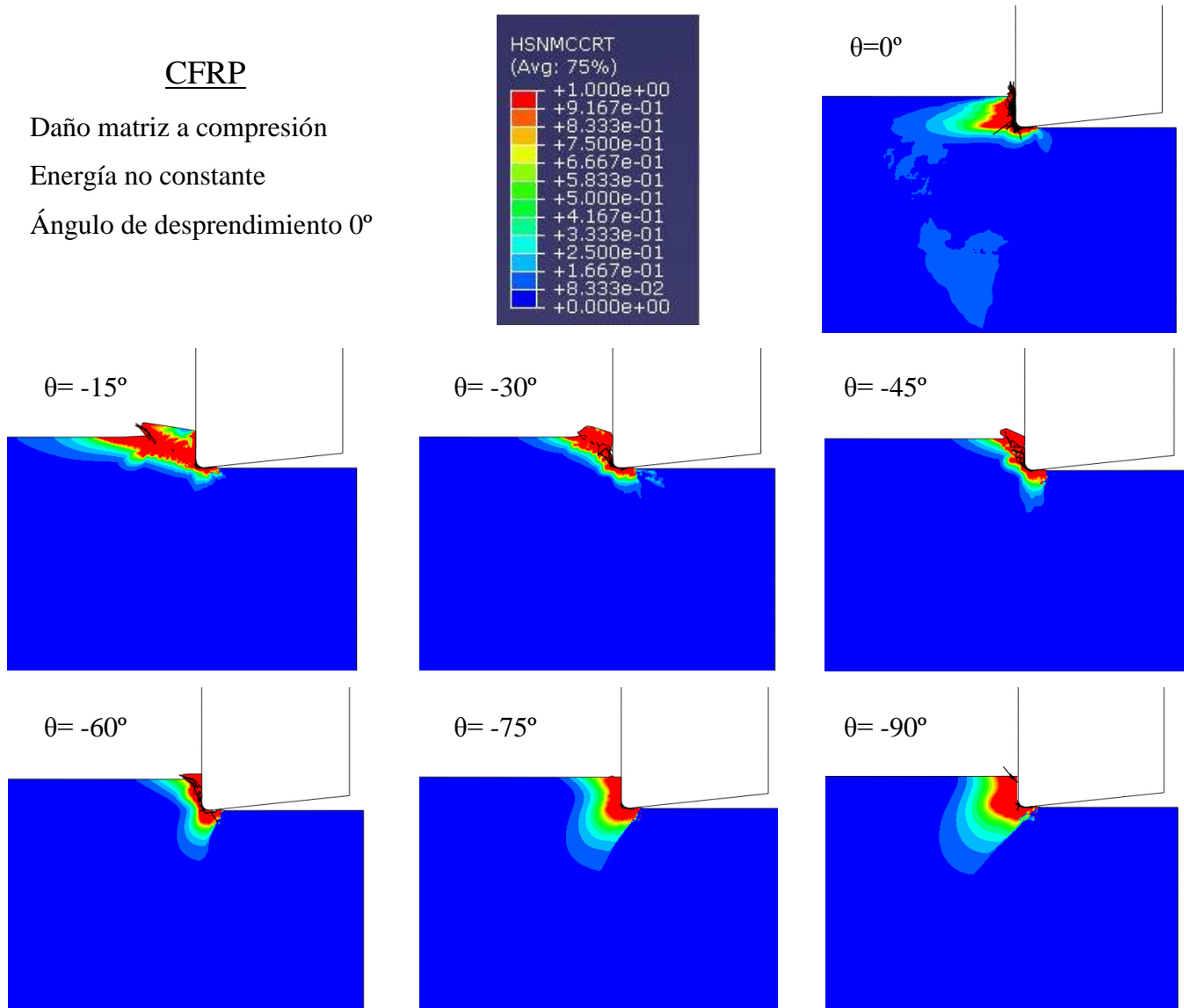


Figura 4.30.-Daño de la matriz a compresión para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante.

CFRP

Daño matriz a tracción

Energía no constante

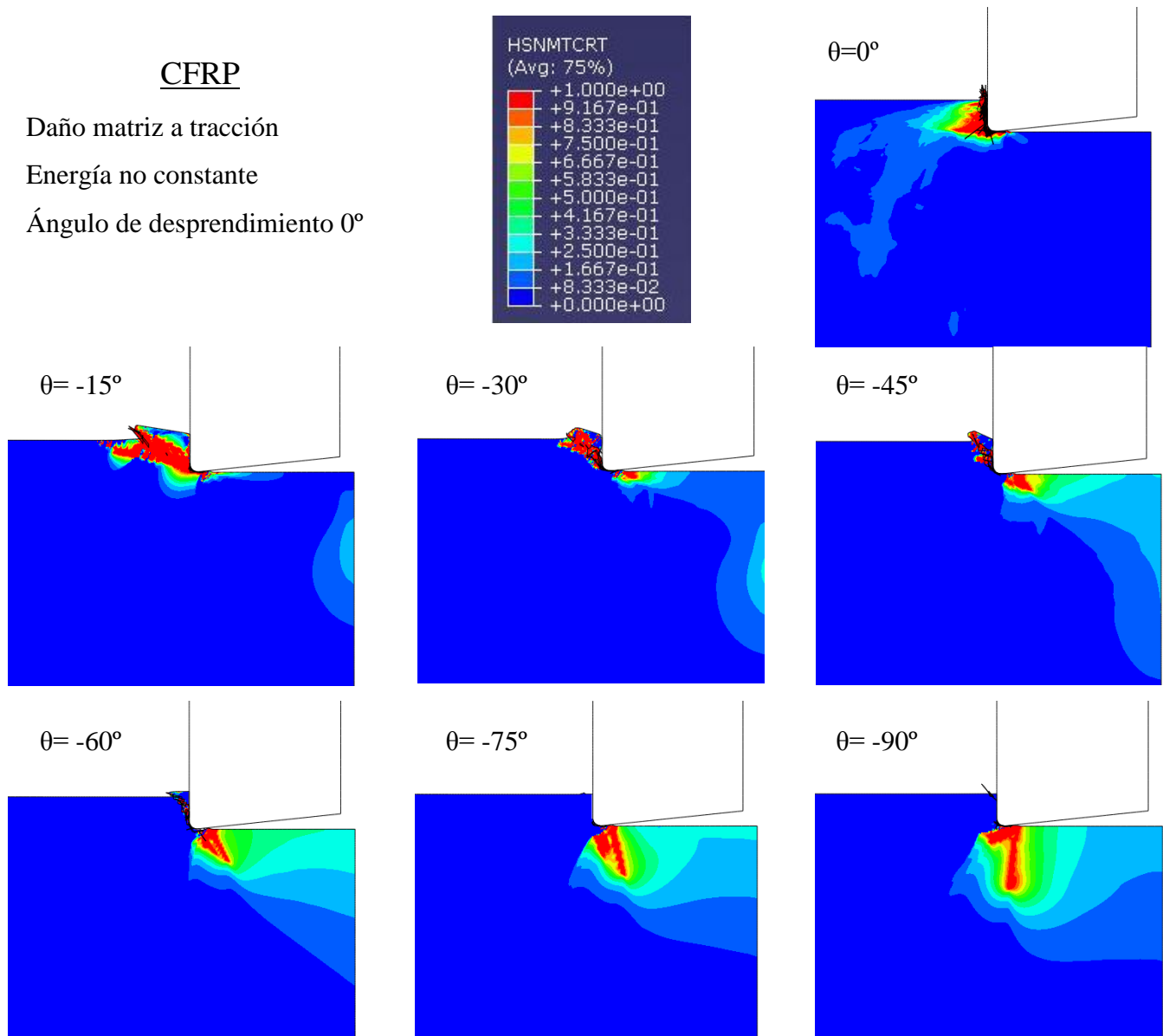
Ángulo de desprendimiento 0° 

Figura 4.31.-Daño de la matriz a tracción para CFRP con un ángulo de desprendimiento de 0° y energía no constante.

Tanto en el daño de la matriz a tracción como a compresión podemos observar que hay diferencias con respecto a los casos de energía constante. El daño es mayor para los casos de energía de deformación no constante y en estos casos, el daño se propaga en la dirección de la orientación de fibra más notablemente que para energía constante. Estas diferencias pueden ser debidas a que las fibras de carbono son frágiles y tienen un comportamiento totalmente distinto al que tiene la matriz. Además, el daño a compresión es mayor que a tracción.

Como en el caso de energía constante, el daño de la matriz tiende a estar localizado en la zona de formación de viruta y no se propaga delante ni debajo de la herramienta como en el caso de los GFRP.

En la figura siguiente, se puede observar que para el caso de CFRP no tiene mucho sentido utilizar una energía constante. En el caso del daño de la matriz a tracción, vemos que para energía constante el daño no sigue la dirección de la fibra como en el caso del daño con energía no constante. El daño se propaga tanto en dirección horizontal, como en dirección vertical, cuando debería seguir la dirección vertical de la fibra, como ocurre en el caso de energía no constante. Por ello, parece que un estudio con la misma energía en las cuatro direcciones, no tiene sentido, ya que se obtienen resultados más adecuados cuando no es constante.

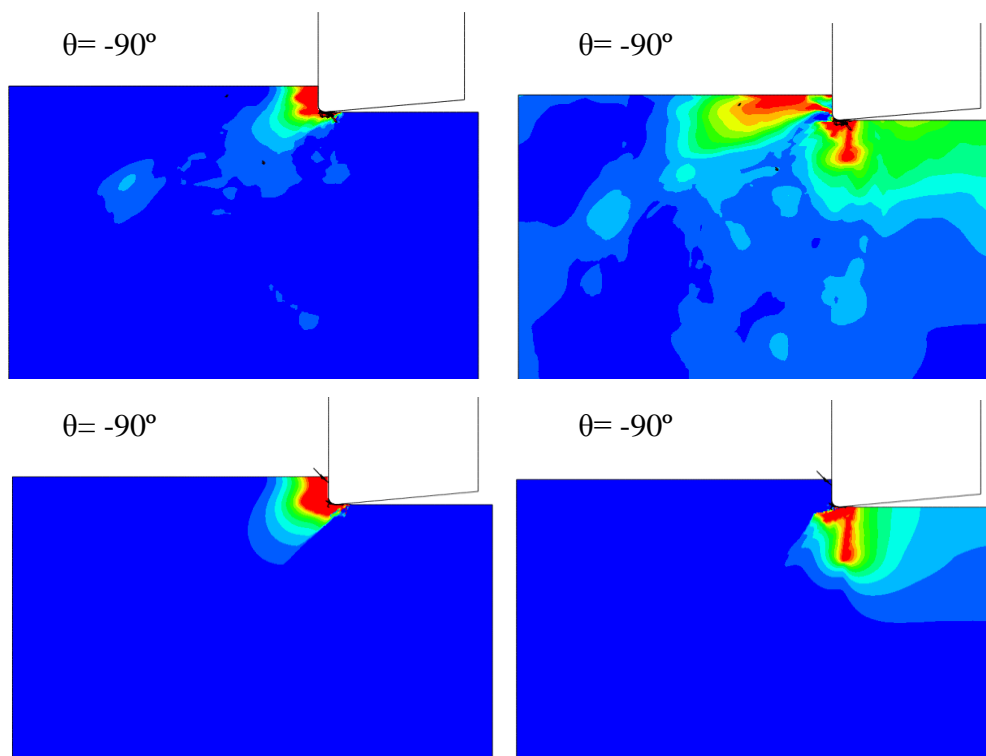


Figura 4.32.- Comparación del daño de la matriz a compresión (izquierda) y tracción (derecha) para orientación de fibra 90° y energía constante (arriba) y no constante (abajo).



4.3.- COMPARACIÓN DE LOS GFRP Y CFRP

Una vez mostrados todos los resultados para el caso de materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio (GFRP) y fibras de carbono (CFRP), se pasa a hacer una comparación del comportamiento de ambos materiales, que nos permitirá sacar algunas conclusiones sobre las diferencias que pueden existir al mecanizar un material frágil y otro dúctil.

Una de las principales diferencias que existen entre estos materiales, y que ya se ha ido comentando a lo largo de los resultados anteriores, es que para el caso de los CFRP hay diferencia entre los resultados obtenidos con energía de deformación constante y no constante mientras que para los GFRP no existe tal diferencia.

Probablemente esto sea debido a la ductilidad de las fibras de vidrio y a la fragilidad de las fibras de carbono, ya que esto hace que haya un comportamiento más o menos semejante entre las fibras y la matriz respectivamente.

La matriz de un material compuesto siempre tendrá un comportamiento más dúctil que las fibras como se ha explicado en el capítulo anterior. Si cambiamos la energía de deformación en todas las direcciones, pero tanto matriz como fibras tienen un comportamiento dúctil (fibras de vidrio), y por tanto muy semejante, parece que el cambio de la energía de deformación no influye. Sin embargo, si tienen un comportamiento totalmente diferente porque las fibras son frágiles y la matriz dúctil (fibras de carbono), el cambio de energía influye y parece que se comporta mejor con este cambio, ya que aunque no tenemos ensayos para comparar, los resultados parecen ser más razonables como se observaba en la figura 4.32.

Influya o no en los resultados, parece más razonable que la energía de deformación sea distinta para cada dirección, ya que matriz y fibra, tienen comportamientos distintos.

- **Energía constante**

El valor de la energía de deformación constante es:

$$U_{XT} = U_{XC} = U_{YT} = U_{YC} = 220 \text{ J/m}^2$$

A continuación, se expondrán los resultados para el caso de ángulo de desprendimiento 0° y energía constante en todas las direcciones.

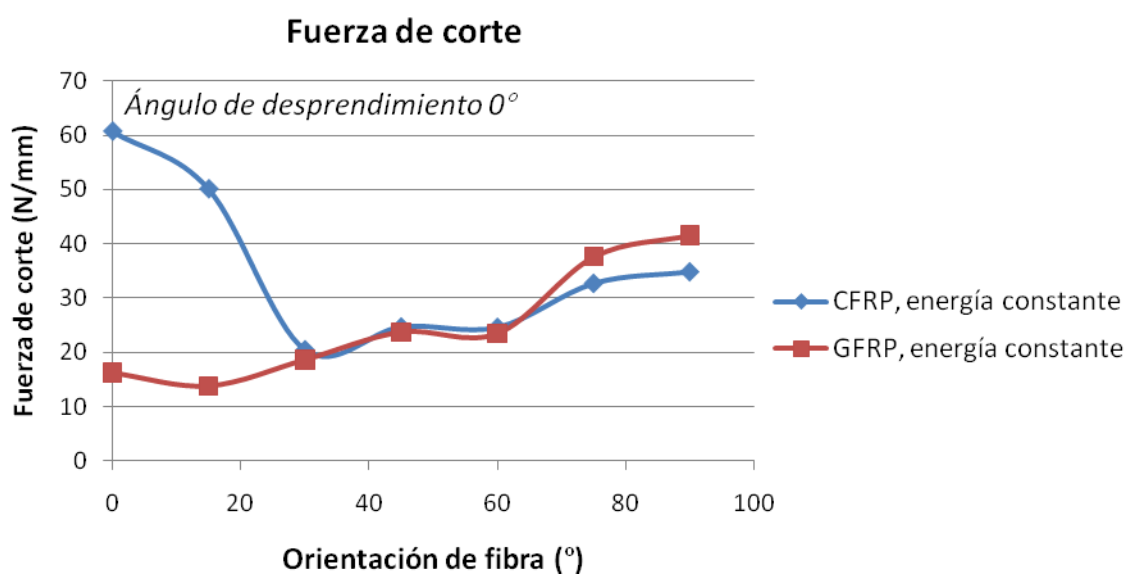


Figura 4.33.- Comparación de las fuerzas de corte para el caso de GFRP y CFRP, ambos para energía constante.

Para el caso de los CFRP se obtienen resultados muy distintos a los de los GFRP, tanto en tendencia como en los valores de las fuerzas. En el caso de CFRP la máxima fuerza de corte se da para el caso de 0° y la mínima para -30° . La máxima fuerza de corte para los CFRP tiene un valor mayor del doble que la mínima fuerza de corte en el caso de los GFRP.

La tendencia en los CFRP es ascendente una vez que se produce el gran descenso de la fuerza desde 0° a -30° . En ambos casos, las fuerzas aumentan progresivamente hasta el caso de -60° y luego fuertemente hasta -90° .

Para orientaciones bajas, las fuerzas de corte son superiores en el caso de los CFRP, mientras que para orientaciones altas, las fuerzas de corte son superiores para el caso de los GFRP.

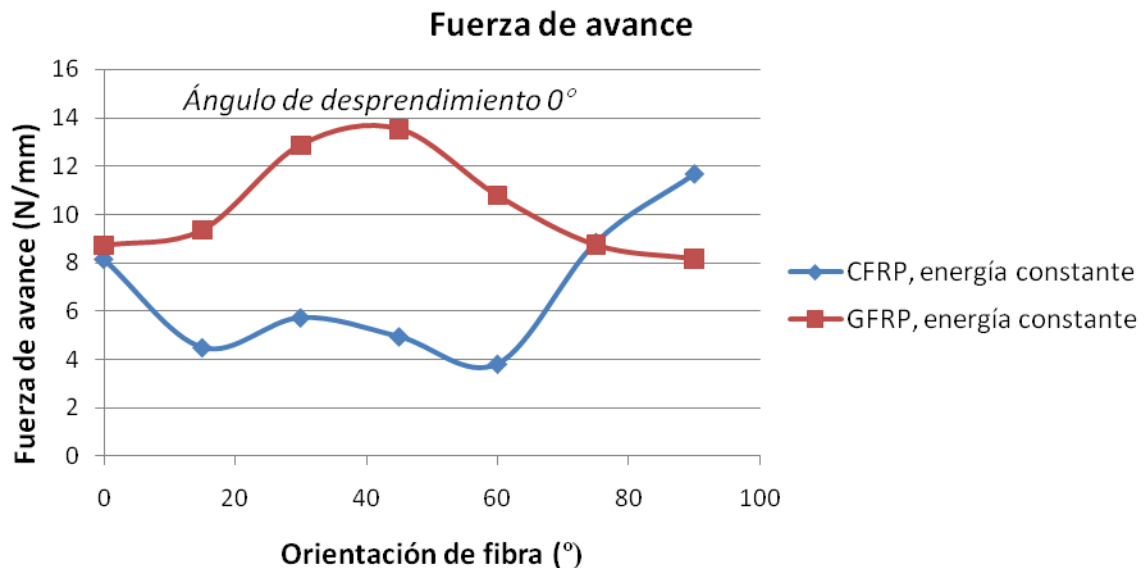


Figura 4.34.- Comparación de las fuerzas de avance para el caso de GFRP y CFRP, ambos para energía constante.

La fuerza de avance tiene una tendencia distinta para los casos de CFRP y GFRP. El mínimo valor de fuerza se obtiene para -60° para los CFRP y en -90° para los GFRP. Y el máximo en -90° para CFRP y en -45° para GFRP. Los valores para el caso de CFRP son menores que los de GFRP, siendo la mitad o más de la mitad para algunos casos.

- **Energía no constante**

El valor de la energía de deformación no es constante en todas las direcciones, siendo sus respectivos valores para el caso de GFRP:

$$U_{XT} = 82 \text{ J/m}^2$$

$$U_{XC} = 44 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YT} = 123 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YC} = 185 \text{ J/m}^2$$

Para el caso de CFRP, tenemos:

$$U_{XT} = 194 \text{ J/m}^2$$

$$U_{XC} = 112 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YT} = 291 \text{ J/m}^2$$

$$U_{YC} = 437 \text{ J/m}^2$$

A continuación, se expondrán los resultados para el caso de ángulo de desprendimiento 0° y energía no constante en todas las direcciones.

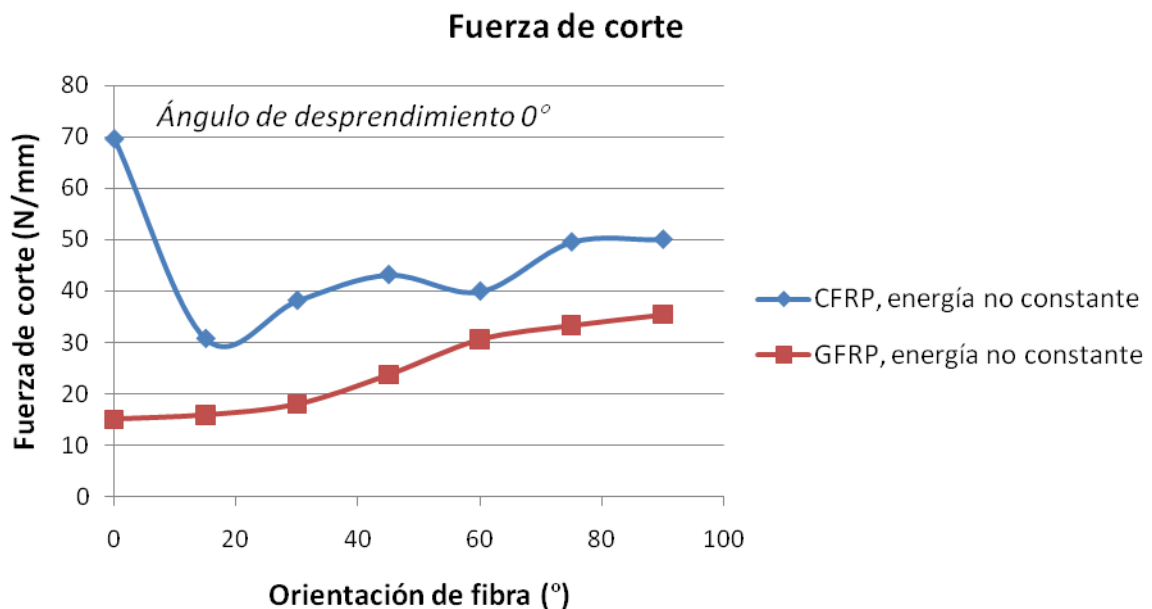


Figura 4.35.- Comparación de las fuerzas de corte para el caso de GFRP y CFRP, ambos para energía no constante.

Al igual que en el caso de energía constante, los resultados de los GFRP y CFRP son distintos en valores y en forma. El valor mínimo para los CFRP se da para orientaciones de fibra de -15° y el máximo para 0° . En el caso de los GFRP el mínimo se da para 0° y el máximo para -90° . Mientras que en los GFRP la tendencia es ascendente desde el principio, en los CFRP hay un gran descenso desde 0° a -15° , después la fuerza de corte asciende para volver a descender en -60° y volver a ascender hasta -90° donde desciende otra vez. Además los valores de las fuerzas de corte para los CFRP son mayores que para los GFRP.

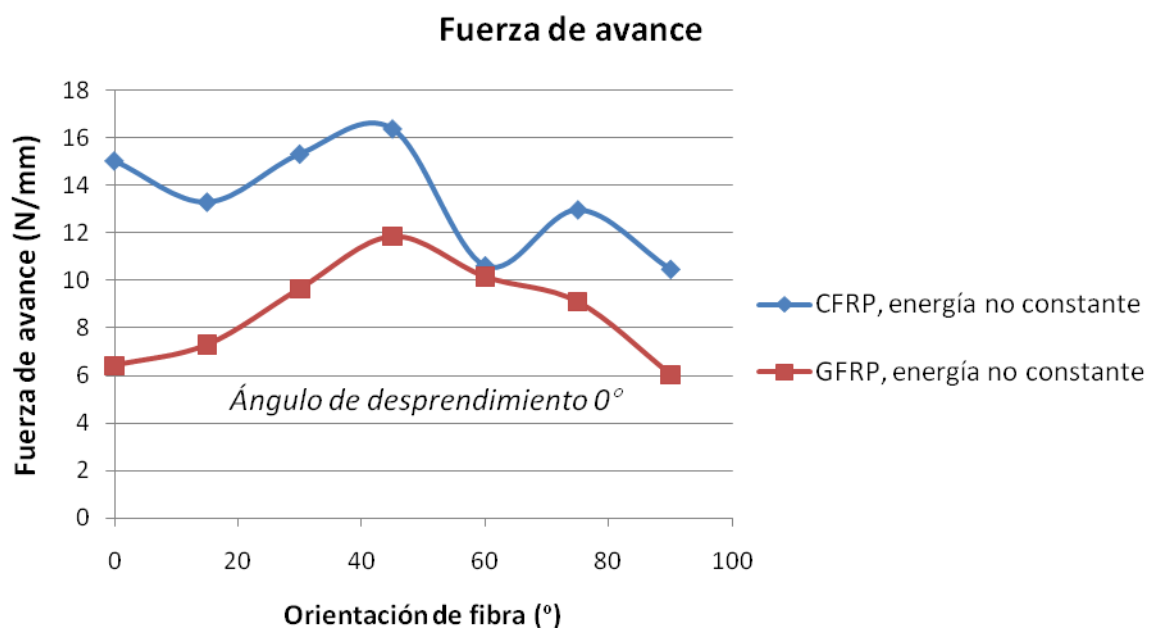


Figura 4.36.- Comparación de las fuerzas de avance para el caso de GFRP y CFRP, ambos para energía no constante.

En el caso de la fuerza de avance para energía no constante, los máximos y mínimos tanto en el caso de los CFRP como en el caso de los GFRP se dan en las mismas orientaciones. La tendencia es algo distinta ya que para los GFRP la curva crece hasta -45° y luego baja hasta -90° , mientras que para los CFRP la curva baja y sube repetidas veces. Los valores de las fuerzas son superiores para el caso de CFRP, siendo estas el doble en algunos casos.



Por último, observando las figuras 4.14, 4.15, 4.18, 4.19, 4.26, 4.27, 4.30, y 4.31, podemos concluir que el daño de la matriz es totalmente diferente para los casos de GFRP y CFRP. Mientras que en los GFRP, la energía de deformación no contribuye a ningún cambio en el daño de la matriz, en los CFRP sí influye, siendo menor el daño cuando se tiene energía de deformación constante. El daño es mucho mayor para los materiales reforzados con fibras de vidrio que para los reforzados con fibras de carbono.

Otra de las diferencias entre el daño de la matriz de estos dos materiales, es que en el caso de los GFRP, el daño se propaga delante y debajo de la herramienta, según la orientación de fibra, y en el caso de los CFRP, el daño se localiza en la zona de formación de viruta.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas una vez finalizado el estudio de este proyecto y se proponen trabajos futuros cuyo estudio puede ser de gran interés y pueden ayudar a complementar el presente proyecto.

- **CONCLUSIONES**

Los objetivos principales de este proyecto eran analizar y validar el modelo propuesto para materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio con los resultados experimentales de la bibliografía y comparar este modelo con los resultados del estudio realizado con materiales compuestos reforzados con fibras de carbono. Las conclusiones obtenidas son:

1.- El modelo de los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio ha sido analizado y validado frente a los resultados experimentales de Bhatnagar, ya que las tendencias de las fuerzas de corte y avance son las mismas y los valores numéricos son similares.

2.- Se han obtenido resultados teóricos para el comportamiento de los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono, lo que simplificará estudios y ensayos posteriores. Además, se ha comparado su comportamiento con los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio.

3.- El daño de la fibra es despreciable frente al daño de la matriz, tanto a tracción como a compresión, debido a que el daño de las fibras es muy inferior al daño de la matriz.

4.- La orientación de las fibras es un parámetro que tiene mucha influencia en el mecanizado de materiales compuestos, tanto en las fuerzas como en el daño de la matriz, dependiendo de la orientación, estas magnitudes tienen un valor u otro.



5.- No se consideran tan importantes los resultados de los casos con orientaciones de fibra de 0° , ya que no es muy frecuente que se realicen mecanizados de materiales compuestos con esta orientación de fibra, debido a que es poco probable que la fibra se distribuya sin orientación en la matriz.

6.- Las fuerzas de corte tanto en los casos de GFRP como de CFRP tienen valores superiores a las fuerzas de avance.

En los ensayos de Bhatnagar [18], se concluye que para profundidades de corte de 0,2 mm (como es nuestro caso) y orientaciones de fibra menores de -45° , las fuerzas de avance y las fuerzas de corte tienen valores muy cercanos. Y para orientaciones superiores a -45° , las fuerzas de corte son superiores a las fuerzas de avance, independientemente del ángulo de desprendimiento y la profundidad.

En los resultados obtenidos en las simulaciones, se tienen siempre fuerzas de corte superiores a las de avance, sea la orientación que sea, pero la diferencia entre estas es menor para los casos de orientaciones menores a -45° . Por ello, podemos concluir, que el modelo es válido en este aspecto también, ya que reproduce el mismo efecto.

7.- La tendencia de las fuerzas de corte es ascendente tanto en los GFRP, como en los CFRP. Esto se debe a que según aumenta la orientación de fibra, la fibra se va situando cada vez más perpendicular a la dirección de la velocidad de corte de la herramienta, provocando que las fuerzas aplicadas por la herramienta sean mayores para compensar la rigidez de la fibra y la compresión generada en el resto de fibras por delante de la herramienta.

8.- Para energía de deformación constante, los materiales reforzados con fibras de carbono presentan fuerzas de corte mayores que las de los reforzados con fibras de vidrio para orientaciones menores de -30° . Para orientaciones superiores son mayores las fuerzas de corte de los materiales reforzados con fibras de vidrio. Sin embargo, para el caso de energía de deformación no constante, las fuerzas de corte de los casos de fibras de carbono son superiores a las de las fibras de vidrio.



Las fuerzas de avance, en los casos de energía constante, son mayores para las fibras de vidrio que para las de carbono. Y para energía no constante, mayoritariamente son superiores las de las fibras de carbono.

9.- En el caso de los GFRP, las fuerzas de corte y avance son menores que los datos experimentales recogidos en la bibliografía.

10.- El ángulo de desprendimiento no tiene una gran influencia en los resultados de los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio. Los resultados obtenidos de las fuerzas de corte y avance, son similares para ángulos de desprendimiento 5° y 0° . El daño de la matriz es algo superior para ángulos de desprendimiento 5° , excepto para orientaciones de fibra de 0° , donde el daño es bastante superior con ángulo de desprendimiento 0° . Probablemente esto se debe a los efectos de pandeo que se producen al estar colocada la fibra en la dirección del avance de la herramienta. La fibra se comporta como una viga sometida a un axil de compresión en uno de sus extremos y el daño se propaga mucho más hacia abajo.

Aunque llama la atención este resultado, como se ha explicado en el punto 5 de este apartado, a los resultados obtenidos en las simulaciones de orientaciones de fibra 0° no se les da tanta importancia, por lo poco frecuente que es realizar mecanizados en estas condiciones.

11.- Considerar la energía de deformación constante o no en todas las direcciones, es un parámetro que influye en materiales compuestos reforzados con fibras de carbono, pero no tanto en los reforzados con fibras de vidrio. Esta influencia depende de la ductilidad o fragilidad de las fibras, ya que si estas tienen un comportamiento dúctil, tendrán un comportamiento similar al de la matriz, que siempre es dúctil, y por tanto, el cambio de energía no influirá tanto.

Se obtienen fuerzas superiores en el caso de materiales reforzados con fibras de carbono para energía no constante que para energía constante. Para materiales reforzados con fibras de vidrio, se obtienen valores similares, se cambie o no la energía de deformación.



12.- En relación a lo explicado en el punto anterior, se concluye que un modelo con energía de deformación constante no parece tener mucho sentido, debido a que fibra y matriz tienen un comportamiento diferente, aunque en materiales dúctiles como las fibras de vidrio, el comportamiento sea similar, y debido a que se obtienen resultados más razonables, como en el caso de las fibras de carbono. Además, este comportamiento es diferente a tracción y a compresión, y por ello, se tiene que tener en cuenta una energía de deformación distinta a tracción y a compresión.

13.- El daño de la matriz es mayor en los GFRP que en los CFRP. Y este para el caso de las fibras de carbono, es mayor con energía no constante. Como se ha explicado anteriormente, en el caso de las fibras de vidrio, la energía de deformación no tiene mucha influencia y por tanto, el daño de la matriz es similar en ambos casos.

El daño de la matriz para los GFRP se propaga por debajo y delante de la herramienta, mientras que en los CFRP se localiza en la zona de formación de viruta. La propagación más preocupante del daño es la que se produce por debajo de la herramienta, ya que la que se produce delante de ella, se eliminará según se mecanice la pieza, pero el daño producido debajo de la herramienta permanecerá en la pieza.

En ambos materiales, el daño de la matriz se propaga según la orientación de la fibra.



- **TRABAJOS FUTUROS**

A continuación se proponen ideas que han ido surgiendo mientras se ha desarrollado este proyecto, con el objetivo de poder complementar este y seguir avanzando en la investigación del mecanizado de los materiales compuestos, ya que hoy en día están tomando una gran importancia en la industria.

1.- Realizar un modelo en 3D que permita estudiar distintas orientaciones de fibra en el mismo modelo. Es decir, aquí se ha trabajado con un modelo en 2D con el que sólo se pueden estudiar casos en los que las fibras tengan la misma orientación.

2.- Programar en ABAQUS el criterio de Tsai-Hill para poder comparar el daño de la matriz con la bibliografía.

3.- Estudiar el daño y desgaste que sufre la herramienta en el mecanizado de este tipo de materiales, con el objetivo de analizar su vida en servicio.

4.- Estudiar la influencia del parámetro de la profundidad de corte.

5.- Estudio del radio de punta de la herramienta.

6.- Estudio de la velocidad de corte.

7.- Estudio sobre la curva σ - ϵ de los CFRP y GFRP, con el objetivo de poder calcular la energía de deformación, en las cuatro direcciones, de manera más exacta.

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID****Escuela Politécnica Superior****PRESUPUESTO DE PROYECTO****1.- Autor:** Laura Montero García.**2.- Departamento:** Ingeniería Mecánica.**3.- Descripción del Proyecto:**- *Título:* Estudio del mecanizado de materiales compuestos- *Duración (meses):* 5*Tasa de costes Indirectos:* 20%**4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):** 33.014 Euros**5.- Desglose presupuestario (costes directos)**

PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes) ^{a)}	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformidad
Soldani, Xavier		Ingeniero Senior	1	4.289,54	4.289,54	
Montero García, Laura		Ingeniero	5	2.694,39	13.471,95	
Hombres mes 6				Total	17.761,49	

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable ^{d)}
3 ordenadores de calculo	1.500,00	100	12	24	750,00
3 licencias de Abaqus	9.000,00	100	12	12	9.000,00
Total					9.750,00



d) Fórmula de cálculo de la Amortización: $\frac{A}{B} \cdot C \cdot D$

A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación (60 meses)

C = coste del equipo (sin IVA)

D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
Total		0,00

OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO^{e)}

Descripción	Empresa	Costes imputable
Total		0,00

e) Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible, viajes y dietas, otros,...

6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	17.761
Amortización	9.750
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	0
Costes Indirectos	5.502
Total	33.014



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Francisco Mata Cabrera: ‘Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles’. Técnica industrial, Vol. 254. Septiembre (2004).
- [2] <http://www.ifi.uio.no/siag/problems/grandine/> Accedido en Junio de 2010.
- [3] <http://www.tenniswarehome-europe.com> Accedido en Junio de 2010.
- [4] http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0104/Rawal_0104.html Accedido en Junio de 2010.
- [5] <http://www.sobreruedas.org/articulos/articulos-tecnologia/frenos-ceramicos> Accedido en Junio de 2010.
- [6] M. Olivares Santiago, C. Galán Mavín, J. Roa Fernández: ‘Los composites: características y aplicaciones en la edificación’. Informes de la Construcción, Vol. 54, nº 484. Marzo – Abril (2003).
- [7] Apuntes de Laboratorio de Tecnologías II 2º Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica.
- [8] González Iglesias, Javier: ‘Efecto del tratamiento superficial de fibras de vidrio en la resistencia mecánica de materiales compuestos de matriz epoxídica’, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III, 2000.
- [9] http://www.fibertex.com.br/plastico_reforzado.htm Accedido en Junio de 2010.
- [10] http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc_docencia/Tema7_CM.pdf Accedido en Junio de 2010.



[11] López de Lacalle Marcaide, Luis Norberto: 'Mecanizado de alto rendimiento', Ediciones Técnicas Izaro (2004)

[12] Apuntes de Tecnología Mecánica 3º Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica.

[13] M^a Henar Miguélez, José Luis Cantero, José Antonio Canteli, José Guillermo Filippone: 'Problemas resueltos de Tecnología de Fabricación', Thomson Paraninfo (2005).

[14] <http://www.turbomecanica.cl/fallas.html> Accedido en Junio de 2010.

[15] http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industriales/sistemasinteligentes/FFlexible/Introduccion_al_MEF.pdf Accedido en Junio de 2010.

[16] Koplev, A., Lystrup, A., and Vorm, T.: 'The Cutting Process, Chips, and Cutting Forces in Machining CFRP'. Composites, 14(4):371–376. (1983).

[17] Takeyama, H. and Iijima, N.: 'Machinability of Glass Fiber Reinforced Plastics and Application of Ultrasonic Machining'. Annals of CIRP, 37:93–96. (1988).

[18] Bhatnagar, N; Nayak D; Singh, I; Chouhan, H; Mahajan P.: 'Determination of machining induced damage characteristics of fiber reinforced plastic composite laminates'. Materials and Manufacturing Processes; 19 (6): 1009-1023. (2004).

[19] Inoue, H. and Yuge, T.: 'Study on the Surface Finish after Cutting Glass Fiber-Reinforced Plastics'. In Advances in Fiber Composite Materials, T. Fukuda, Z. Maekawa and T. Fujii, eds., Elsevier Science, Japan, pp. 261–274. (1994).

[20] Wang, X.M. and Zhang, L.C.: 'An Experimental Investigation into the Orthogonal Cutting of Unidirectional Fiber Reinforced Plastics'. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43:1015–1022. (2003).



[21] Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N.K., and Komanduri, R.: 'On the Machining of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Composite Laminates'. International Journal of Machine Tools and Manufacture; 35:701–716. (1995).

[22] Komanduri R.: 'Machining fibre-reinforced composites'. Mech Eng; 115:58–64. (1993).

[23] Wern CW, Ramulu M, Shukla A.: 'Investigation of stress in the orthogonal cutting of fibre-reinforced plastics'. Exp Mech; 36(1):33–41. (1996).

[24] Pwu HY, Hocheng H. Chip formation model of cutting fiberreinforced plastics perpendicular to fiber axis. J Manufact Sci Eng; 120:192–6. (1998).

[25] Wang DH, Ramulu M, Arola D.: 'Orthogonal cutting mechanisms of Graphite/Epoxy, composite part II: multi directional laminate'. Int J Mach Tool Manufac; 35(12): 1639–48. (1995).

[26] Arola D, Ramulu M.: 'Orthogonal cutting of fibre-reinforced composites: a finite element analysis'. Int J Mach; 39(5):597–613. (1997).

[27] Mkaddem, A; Demirci, I; El Mansori, M.: 'A micro–macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis'. Composites Science and Technology; 68: 3123–3127. (2008).

[28] Lasri L, Nouari M, El Mansori M.: 'Working parameters effects on machining induced damage of fibre-reinforced composites: numerical simulation analysis'. Int J Mater Prod Technol; 32(2–3):136–51. (2008).

[29] Venu Gopala Rao G, Mahajan P, Bhatnagar N.: 'Micro-mechanical modelling of machining of FRP composites-cutting force analysis'. Compos Sci Technol; 67(3–4):579–93. (2007).



[30] Ramesh, M.V; Seetharamu, K.N; Ganesan, N; Shivkumar, MS. ‘Analysis of Machining of FRPs using FEM’. International Journal of Machine Tools and Manufacture; 38: 1531-1549. (1998).

[31] Mahdi, M; Zhang, L. An adaptive three – dimensional finite element algorithm for the orthogonal cutting of composite materials, Journal of Materials Processing Technology; 113: 368-372. (2001).

[32] Mahdi, M; Zhang, L.: ‘A finite element Model for the orthogonal cutting of fiber reinforced composite materials’. Journal of Materials Processing Technology; 113:368-372. (2001).

[33] Arola, D; Sultan, M.B; Ramulu, M.: ‘Finite element modeling of edge trimming fiberreinforced plastics’. Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology; 124: 32-41. (2002).

[34] Miguélez, H; Zaera, R; Molinari, A; Cheriguene, R; Rusinek, A.: ‘Residual stresses in orthogonal cutting of metals: the effect of thermomechanical coupling parameters and of friction’. Journal of Thermal Stresses; 32: 1–20. (2009).

[35] de Blas Luna, Rubén: ‘Análisis paramétrico del corte ortogonal de materiales compuestos mediante modelización numérica’ Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III, 2010.

[36] Santiuste C.; Soldani X.; Miguélez, H.: ‘Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components’. (2009).

[37] Cheriguene R.: ‘Estudio numérico de los fenómenos de contacto en el mecanizado’. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III.

[38] Díaz Santos, Manuel: ‘Fabricación y mecanizado de materiales compuestos’, EUIT Aeronáutica, Sección de publicaciones (1992).